

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA STROJNÍ

Katedra energetických zařízení



Jan Hujer

Mechanismy kolapsů kavitačních bublin v blízkosti pevných povrchů (Mechanisms of cavitation bubble collapses near the solid boundaries)

Vedoucí diplomové práce: Ing. Miloš Müller, Ph.D.

Konzultant diplomové práce: Ing. Patrik Zima, Ph.D.

Rozsah práce:	původní zpráva	přílohy
Počet stran:	82	V
Počet obrázků:	47	0
Počet tabulek:	0	4
Počet grafů:	20	0
Počet příloh:	4	-

Liberec 2013

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Jméno a příjmení	Bc. Jan Hujer
Studijní program	N2301 Strojní inženýrství
Obor	3901T003 Aplikovaná mechanika
Zaměření	Mechanika tekutin a termodynamika

Ve smyslu zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách se Vám určuje diplomová práce na téma:

Mechanismy kolapsů kavitačních bublin v blízkosti pevných povrchů

Zásady pro vypracování:

(uveďte hlavní cíle diplomové práce a doporučené metody pro vypracování)

1. Provést rešerši interakce kavitačních bublin s pevnými povrchy a rešerši způsobu buzení kavitačních bublin.
2. Zjistit kalibrační křivky pro měření intenzity interakce bublinky se stěnou pomocí PVDF filmu a provést diskuzi platnosti kalibrace.
3. Sestavit experimentální zařízení pro měření síly interakce bublinky s pevnou stěnou.
4. Vyhodnotit režimy chování kavitační bublinky v blízkosti pevné stěny pro několik různých poloměrů bublinky.
5. Vyhodnotit sílu interakce pro zjištěné režimy.

Forma zpracování diplomové práce:

- původní zpráva: cca 50 stran
- grafické práce: 10

Seznam odborné doporučené literatury:

- [1] Brdička M., Samek L., Taraba O.: Kavítace, Diagnostika a technické využití. SNTL. Praha. 1981, 336 s.
- [2] Noskijevič, J.: Kavítace. Academia. Praha. 1969, 280 s.
- [3] Franc, J., P., Michel, J., M.: Fundamentals of cavitation. Springer, 2004.
- [4] Franc, J., P., Michel, J., M.: Fundamentals of cavitation. Springer, 2004.
- [5] Benjamin, T., B., Ellis, A., T.: The Collapse of Cavitation Bubbles and the Pressures thereby Produced against Solid Boundaries. Phil. Trans. R. Soc. Lond., Series A., 1966, vol. 260, no. 1110, pp. 221-240.. 537-550.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Miloš Müller, Ph.D.

Konzultant diplomové práce: Ing. Patrik Zima, Ph.D.



doc. Ing. Václav Dvořák, Ph.D.
vedoucí katedry

doc. Ing. Miroslav Malý, CSc.
děkan

V Liberci dne 21. března 2013

Platnost zadání diplomové práce je 15 měsíců od výše uvedeného data. Termíny odevzdání diplomové práce jsou určeny pro každý studijní rok a jsou uvedeny v harmonogramu výuky.

MECHANISMY KOLAPSŮ KAVITAČNÍCH BUBLIN V BLÍZKOSTI PEVNÝCH POVRCHŮ

Anotace: Diplomová práce je zaměřena na popis chování kavitační bubliny v blízkosti stěny. V úvodu jsou vysvětleny jevy kavitace a známé způsoby interakce kavitační bublinky s pevnými povrchy. Jsou zde zmíněny možné způsoby generování kavitačních bublin a mechanismy kavitačního poškození materiálů. Práce detailně popisuje sestavu experimentu, použité principy měření, způsob generování kavitačních bublin při experimentu a faktory ovlivňující experiment. Chování bublinky v blízkosti stěny je studováno opticky pomocí CCD kamery a akusticky s použitím PVDF filmu a PVDF jehlového hydrofonu. Zvláštní pozornost je věnována popisu měřicího členu s integrovaným PVDF filmem popisu vlastností PVDF filmu a diskuzi omezení při jeho použití. Další část je zaměřena na kalibraci PVDF filmu metodou pádu kuličky. Následně jsou uvedeny popis parametrů experimentu, metodika zpracování výsledků a vyhodnocení charakteru chování kavitačních bublinek v blízkosti povrchů při různých režimech. V práci je provedeno porovnání hodnot sil a tlaků generovaných během kolapsu bublinky v blízkosti stěny pro různé mechanismy kolapsu.

Klíčová slova: kavitační bublinka, kavitace, kolaps bublinky, PVDF film, pevná stěna.

MECHANISMS OF CAVITATION BUBBLE COLLAPSES NEAR THE SOLID BOUNDARIES

Annotation: The diploma thesis is focused on a description of the cavitation bubble behaviour close to a solid wall. The cavitation phenomena and known bubble-wall interactions are explained in the introduction chapter. Possible methods of the cavitation bubble generation and mechanism of the cavitation erosion are noted here. The used experimental setup, measurement principles, the bubble generation method used in experiment and factors influencing the experiment are described in detail. The bubble behaviour close to a solid wall is investigated optically using a high speed CCD camera and acoustically using PVDF film and PVDF needle hydrophone. Special focus is given on the description of the measurement element with a built-in PVDF film, the film properties description and a discussion regarding the limitation of the utilization of the PVDF film. The calibration of the PVDF film using the drop ball test is used in the work. The methodology of the results evaluation, experiment parameters and the evaluation of the bubble collapse patterns are shown in the work. The comparison of the force and pressure magnitudes generated during the bubble collapse close to a solid wall for different collapse mechanisms are presented.

Key words: cavitation bubble, cavitation, bubble collapse, PVDF film, solid boundary.

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

V Liberci 24.5.2013

Podpis

Declaration

I have been notified of the fact that Copyright Act No. 121/2000 Coll. applies to my thesis in full, in particular Section 60, School work.

I am fully aware that the Technical University of Liberec is not interfering in my copyright by using my thesis for the internal purposes of TUL.

If I use my thesis or grant a licence for its use, I am aware of the fact that I must inform TUL of this fact; in this case TUL has the right to seek that I pay the expenses invested in the creation of my thesis to the full amount.

I compiled the thesis on my own with the use of the acknowledged sources and on the basis of consultation with the head of the thesis and a consultant.

Liberec, 24.5.2013

Signature

Poděkování

Diplomová práce vznikla za podpory projektu GAP101/10/1428 - Mechanizmy kolapsu a štěpení ultrazvukem buzených kavitačních bublin v blízkosti pevné stěny v Newtonské kapalině (2010-2012, GA0/GA).

Současně bych chtěl vyslovit velké díky panu Ing. Milošovi Müllerovi, Ph.D. za ochotu, lidský přístup a trpělivost při konzultacích k diplomové práci, za poskytnutí studijních materiálů a pomoc při měřeních. Patrikovi Zimovi děkuji za věcné připomínky při zpracování diplomové práce. Vděčný jsem rovněž i své univerzitě za vědomosti a zkušenosti získané při studiu. Poděkování patří i mé rodině za podporu při studiu.

Jan Hujer

Obsah

Anotace:	4
Prohlášení	6
Poděkování	7
Seznam symbolů a jednotek	9
Seznam zkratk	11
Seznam obrázků	12
Seznam grafů	14
1 ÚVOD	15
2 KAVITACE	16
2.1 Kavitace a její fyzikální podstata	16
2.2 Dynamika kavitační bublinky	17
2.3 Vlivy na chování kavitační bublinky a její stabilita	18
2.4 Chování kavitační bublinky - symetrický případ	20
2.5 Chování kavitační bublinky - asymetrický případ	21
2.6 Způsoby generace kavitačních bublin	24
2.7 Kavitační poškození povrchů	29
3 EXPERIMENTÁLNÍ SESTAVA	31
3.1 Generování kavitačních bublin	33
3.2 Ocelová destička s PVDF filmem	35
3.3 Použitá zařízení	36
3.4 Omezení a vyplývající parametry experimentu	41
4 KALIBRACE PVDF FILMU	44
4.1 Popis PVDF filmu a jeho dynamické vlastnosti	44
4.2 Rozbor omezení a volba metody kalibrace PVDF filmu	46
4.3 Měření piezoelektrické nábojové konstanty d_{33} PVDF filmu	48
4.4 Kalibrace PVDF filmu metodou pádu kuličky	52
5 EXPERIMENT	58
5.1 Vstupní parametry experimentu	58
5.2 Popis a nastavení experimentu	59
5.3 Metodika zpracování naměřených dat	59
5.4 Vzory chování kavitační bublinky v blízkosti pevné stěny	63
5.5 Síly interakce kavitační bublinky a pevné stěny	69

5.6 Mechanické napětí působící na PVDF film	73
5.7 Hodnocení změny energie mezi 1. a 2. kolapsem	75
5.8 Hodnocení snímků.....	76
5.9 Shrnutí vyhodnocení	78
6 ZÁVĚR.....	80
Seznam použité literatury.....	81
Seznam příloh.....	83

Seznam symbolů a jednotek

h	vzdálenost kuličky od PVDF filmu [m]
I	impuls síly [N.s]
f	frekvence [Hz]
C	elektrická kapacita [F]
d_{xx}	piezoelektrická nábojová konstanta [C.N ⁻¹]
E	energie bublinky [J]
g_{xx}	piezoelektrická napěťová konstanta [V.m.N ⁻¹]
ρ	hustota kapaliny [kg.m ⁻³]
ε	permitivita prostředí [F.m ⁻¹]
F	síla [N]
F_k	konstantní síla [N]
u_A	nejistota typu A [jedm.]
u_B	nejistota typu B [jedm.]
u_C	kombinovaná nejistota C [jedm.]
σ	povrchové napětí kapaliny [Nm ⁻¹]
k	korekční koeficient [-]
k_u	koeficient rozšíření [-]
k_u	citlivost hydrofonu [mV.MPa ⁻¹]
L	vzdálenost středu bublinky od stěny [m]
m	hmotnost kuličky [kg]
m_r	koeficient rozdělení [-]
γ	parametr γ [-]
μ	dynamická viskozita [Pa.s]
p	tlak v kapalině [Pa]
p_s	parciální tlak nasycených par uvnitř kavitační bubliny [Pa]
R	poloměr kavitační bubliny [m]
R_E	elektrický odpor [Ω]
R₀	počáteční poloměr kavitační bubliny [m]
R²	koeficient determinace [-]
p_h	hybnost [kg.m.s ⁻¹]
p_B	tlak uvnitř bubliny [Pa]

p_{∞}	tlak kapaliny v nekonečnu [Pa]
R'	rychlost změny poloměru bubliny [$m.s^{-1}$]
R''	zrychlení změny poloměru bubliny [$m.s^{-2}$]
T_B	teplota v bublince [K]
T_S	teplota v na mezi sytosti [K]
t_c	doba kolapsu kavitační bublinky [s]
t_c	tloušťka PVDF filmu [m]
τ	časová konstanta [s]
t	čas [s]
R_{max}	maximální poloměr bublinky [m]
U	elektrické napětí [V]
v	rychlost pohybu kuličky [$m.s^{-1}$]
X	mechanické napětí PVDF filmu [Pa]
Z	zesílení signálu [-]
Z_{max}	maximální rozsach odchylek [jedm.]

Seznam zkratk

AISI	Americký institut železa a oceli - A merican i ron and s teel i nstitute
BNC	označení bajonetové koncovky vodiče b ayonet N eill - C oncelman
CCD	zařízení s nábojově vázanou strukturou - c harge - c oupled d evice
FWHM	metoda zpracování dat F ull w idth at h alf m aximum
LED	dioda emitující světlo - L ight E mitting D iode
PVDF	polymer p oly v inylid e n f luorid
PCI	označení sběrnice - P eripheral C omponent I nterconnect
PXI	elektronická modulární platforma - P CI e xtensions for i nstrumentation
SMB	označení koncovky vodiče S ub M iniature version B
TUL	Technická univerzita v Liberci

Seznam obrázků

Obr. 2.1: Rovnovážný – fázový diagram

Obr. 2.2: Vliv tepelných efektů [7]

Obr. 2.3: Chování kavitační bublinky – symetrický případ [8]

Obr. 2.4: Jet efekt [9]

Obr. 2.5: Složení jetu [10]

Obr. 2.6: Splash efekt

Obr. 2.7: Kolaps polokulové bublinky v blízkosti pevné stěny [11]

Obr. 2.8: Chování dvojice bublinek [12]

Obr. 2.9: Vzájemná interakce kavitační bublinky, vzduchové bublinky a stěny [13]

Obr. 2.10: Akusticky generovaná kavitační bublinka [14]

Obr. 2.11: Bublinka generovaná elektrickým výbojem [15]

Obr. 2.12: Bublinka generovaná teplem přechodového odporu [16]

Obr. 2.13: Bublinka generovaná laserem [18]

Obr. 2.14: Kavitační eroze na Francisově turbíně [19]

Obr. 2.15: Místa kavitační eroze na Kaplanově turbíně [19]

Obr. 3.1: Experimentální sestava

Obr. 3.2: Experimentální sestava v laboratoři

Obr. 3.3: Elektrický obvod a nosná konstrukce elektrod

Obr. 3.4: První metoda vytváření dotyku elektrod

Obr. 3.5: Zdokonalená metoda vytváření dotyku elektrod

Obr. 3.5: Zdokonalená metoda vytváření dotyku elektrod

Obr. 3.6: Destička s PVDF filmem

Obr. 3.7: CCD kamera s objektivem

Obr. 3.8: koncovka BNC a koaxiální kabel [22]

Obr. 3.9: LED čip s chladičem a jeho zdroj

Obr. 3.10: Generátor signálu

Obr. 3.11: Zdroj stejnosměrného elektrického napětí a proudu

Obr. 3.12: PVDF hydrofon a zesilovač signálu PVDF hydrofonu

Obr. 3.13: PXI box

Obr. 3.14: Oscilografická karta [23]

Obr. 3.15: Karta do počítače

Obr. 3.16 SMB koncovka [22]

Obr. 3.17: Pohled z boku a shora na jednu z testovaných variant stínění

Obr. 4.1: PVDF film

Obr. 4.2: Dynamika PVDF filmu [21]

Obr. 4.3: Elektrody piezo d_{33} metru s připojenými vodiči PVDF filmu

Obr. 4.4: Proměřované pozice PVDF filmu

Obr. 4.5: Měření piezo d_{33} metrem

Obr. 4.6: Metoda pádu kuličky

Obr. 4.7: Sestava kalibračního měření

Obr. 5.1: Elektrické signály měřidel a odpovídající snímky kavitačních bublinek

Obr. 5.2: První vzor (časový interval mezi snímky je $100\text{ }\mu\text{s}$; $\gamma = 4,73$; $R_{\text{max}} = 4,081\text{ mm}$)

Obr. 5.3: Druhý vzor (časový interval mezi snímky je $100\text{ }\mu\text{s}$; $\gamma = 1,50$; $R_{\text{max}} = 3,816\text{ mm}$)

Obr. 5.4: Třetí vzor (časový interval mezi snímky je $100\text{ }\mu\text{s}$; $\gamma = 1,01$; $R_{\text{max}} = 5,986\text{ mm}$)

Obr. 5.5: Aktivita bublinky $2,2\text{ mm}$ pro $\gamma = 1,01$ (časový interval mezi snímky je $100\text{ }\mu\text{s}$)

Obr. 5.6: Aktivita bublinky $2,2\text{ mm}$ pro $\gamma = 2,69$ (časový interval mezi snímky je $100\text{ }\mu\text{s}$)

Obr. 5.7: Aktivita bublinky $6,0\text{ mm}$ pro $\gamma = 2,66$ (časový interval mezi snímky je $100\text{ }\mu\text{s}$)

Seznam grafů

Graf 2.1: Numerické řešení Rayleighovy-Plessetovy rovnice [6]

Graf 2.2: Kumulativní úbytek hmotnosti různých materiálů při vibrační metodě [20]

Graf 3.1: Opakovatelnost poloměru

Graf 4.1: Napěťový signál z kalibrace

Graf 4.2: Oblast prvního dopadu s proloženými přímkami

Graf 4.3: Graf závislosti středního napětí na PVDF filmu na průměrné síle

Graf 4.4: Graf závislosti maximálního napětí na PVDF filmu na průměrné síle

Graf 5.1: Průběh tlaku na hydrofonu a síly na PVDF filmu pro první vzor

Graf 5.2: Průběh tlaku na hydrofonu a síly na PVDF filmu pro druhý vzor

Graf 5.3: Průběh tlaku na hydrofonu a síly na PVDF filmu pro třetí vzor

Graf 5.4: Závislost maximální síly na parametru γ pro bublinku 2,2 mm

Graf 5.5: Závislost maximální síly na parametru γ pro bublinku 4,1 mm

Graf 5.6: Závislost maximální síly na parametru γ pro bublinku 6,0 mm

Graf 5.7: Závislost poměru $F_{\max 2}/F_{\max 1}$ na parametru γ

Graf 5.8: Závislost γ_{crit} na poloměru R_{\max}

Graf 5.9: Závislost F_{\max} na poloměru γ

Graf 5.10: Závislost maximálního tlaku na γ pro bublinku 2,2 mm

Graf 5.11: Závislost maximálního tlaku na γ pro bublinku 4,1 mm

Graf 5.12: Závislost tlaku na γ pro bublinku 6,0 mm

Graf 5.13: Závislost $\Delta E_{12}/E_{\max}$ na parametru γ

1 ÚVOD

Kavitace je významný fyzikální jev. S kavitací se setkáváme v celé řadě přírodovědných oborů, v technických aplikacích zejména v oblasti hydraulických strojů a zařízení – čerpadel, turbín a armatur. Kavitace s sebou nese široké spektrum různých účinků a z nich plynoucích důsledků. Pro technické aplikace jsou důsledky kavitace nežádoucí a jejich účinkům se snažíme zabránit popř. je minimalizovat. Hlavními důsledky jsou v tomto případě vliv na provozní vlastnosti a související kavitační eroze. Provoz zařízení proto pak musí být omezen a klesá efektivnost přenosu energie. Kavitační eroze vzniká účinky kavitace v blízkosti povrchů částí výše uvedených strojů a zařízení. Projevuje se destruktivním rozrušením materiálu těchto částí a snižuje se tím jejich životnost. Výzkum této oblasti se soustřeďuje na studium mechanismu chování kavitační bublinky a souvisejících jevů v blízkosti pevných stěn. Mechanismus chování kavitační bublinky je značně složitý a není stále dostatečně prozkoumán a popsán.

Cílem této diplomové práce je:

- provedení rešerše interakcí kavitačních bublin s pevnými povrchy a rešerše způsobů generace kavitačních bublin
- kalibrace PVDF filmu pro měření interakce bublinky s pevnou stěnou a provedení diskuze získaných výsledků
- sestavení experimentálního zařízení pro měření síly interakce bublinky s pevnou stěnou
- vyhodnocení režimů chování kavitační bublinky v blízkosti pevné stěny pro několik různých poloměrů kavitační bublinky
- vyhodnocení síly interakce pro zjištěné režimy

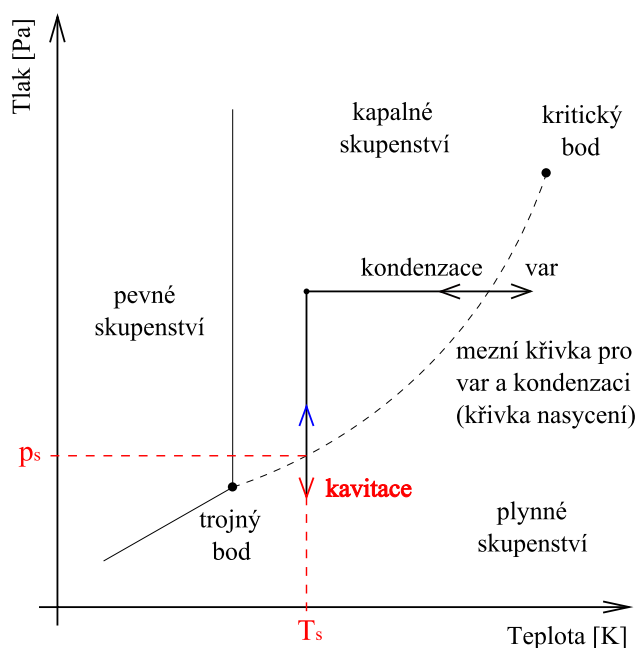
Předkládaná diplomová práce je pokračováním mého studia v oblasti kavitace v navazujícím studijním programu na Katedře energetických zařízení Fakulty strojní TUL. Navazuji na teoretické i praktické poznatky, získané při zpracování bakalářské práce a absolvování předmětů Projekt a Semestrální práce. Upozorňuji proto na skutečnost, že teoretické kapitoly úvodní části diplomové práce, kterými jsem se podrobně zabýval již v bakalářské práci, jsou zde zpracovány v menším rozsahu. Zcela byly vynechány např. kapitoly o obecném výskytu kavitace, použití a rozdělení, o statické rovnováze kavitační bublinky a další. Předmětná práce je zaměřena na problematiku bližší studovanému tématu. Další části diplomové práce jsou zpracovány již standardním způsobem.

2 KAVITACE

2.1 Kavítace a její fyzikální podstata

Kavítace je složitý fyzikální jev, zahrnující vznik, růst a zánik dutin v kapalině. Kavítace se přirozeně vyskytuje při různých dějích, ale často se i uměle generuje. Při přirozených dějích v oblasti hydraulických strojů a zařízení je výskyt kavítace nežádoucí. Ovlivňuje provoz a dochází ke kavitační erozi materiálu. Příkladem toho může být kavítace ve vodních strojích (turbíny, čerpadla), hydraulických ložiskách a hydraulických tlumičích. Při uměle generované kavítaci naopak účinků využíváme. Jedná se například o čištění tvarově složitých povrchů, při přípravě emulzí a řadě aplikací v medicíně.

Fyzikální podstatu a probíhající změny při kavítaci lze znázornit na fázovém diagramu obecné látky na obr. 2.1.



Obr. 2.1: Rovnovážný – fázový diagram

Kavítace vzniká při poklesu tlaku v kapalině na tlak nasycených par p_s , který musí odpovídat dané teplotě kapaliny T_s (hodnoty jsou vázané křivkou nasycení). Při tomto tlaku se kapalina začíná odpařovat. Zvětšuje se tak objem páry a vznikají malé bublinky. Dochází k fázové změně, znázorněné v obrázku červenou šipkou. Tuto fázi označujeme jako počínající kavítaci, bublinka začíná růst. Kavitační bublinka (dále převážně „bublinka“, „bublina“) tvoří v původní kapalině nehomogenitu. Její vnitřek je tvořen buď plynem, nebo parami kapaliny, nebo směsí plynu a par kapaliny. Na počínající kavítaci navazuje fáze rozvité kavítace, kdy

bublinka při stejném tlaku nebo jeho poklesu dále roste. Její další aktivita je závislá na okolních podmínkách. Konečnou fázi existence bublinky označujeme jako zanikající kavitaci. Pokud by došlo k nárůstu tlaku, pára v bublince zkondenzuje (fázová změna ve směru modré šipky v obrázku) a vzniká prázdný prostor, nazývaný kavitační dutina. Okolní kapalina zaplňuje kavitační dutinu velkou rychlostí, bublinka imploduje. Dochází k rázu a vyzáření tlakových rázových vln, které jsou činitelem při kavitační erozi. Popsaný proces zanikající kavitace nazýváme kolapsem kavitační bublinky. Život bublinky často sestává z více cyklů - růstů a kolapsů jdoucích za sebou. Při dalších cyklech ale hodnota poloměru nedosahuje velikosti jako při prvním cyklu. Stejně tak je intenzita následných kolapsů menší (obecně od druhého, v blízkosti u stěny od třetího kolapsu). Je to dáno disipací energie bublinky tlumením viskozitou. Bublinku si lze totiž představit jako mechanický systém hmota-pružina-tlumič, kterému ve skutečnosti popořadě odpovídá hmota kapaliny - plynný obsah bublinky - viskozita kapaliny. Na obrázku 2.1 je také zobrazena horizontála varu a kondenzace. Při varu vznikají v kapalině, jako při kavitaci, parní bublinky. Proces vzniku a dynamika bublinek jsou ale odlišné. Bublinky při varu se totiž utváří dodáváním tepla kapalině za konstantního tlaku.

2.2 Dynamika kavitační bublinky

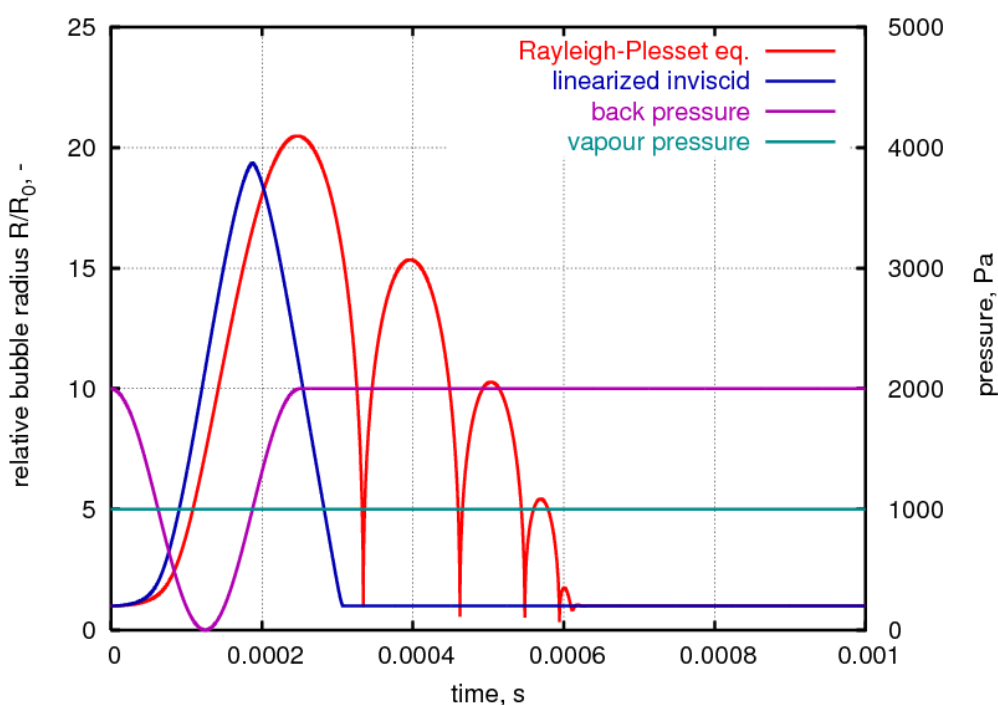
„Život“ kavitační bublinky je složitý dynamický děj. Pokud se kavitační bublinka nachází v oblasti, kde interagují koexistující bublinky, nebo v blízkosti stěn, situace je ještě složitější. Jedním z modelů dynamiky bublinky je Rayleighova-Plessetova rovnice. Při odvození se uvažuje osamocená kavitační bublina kulového tvaru o poloměru R , jejíž vnitřek je tvořen plynem a parou o tlaku p_B a teplotě T_B , oddělenou fázovým rozhraním od okolní kapaliny. Kapalina je charakterizována hustotou ρ , dynamickou viskozitou μ , povrchovým napětím σ a teplotou T_∞ a tlakem p_∞ ve vzdálené neovlivněné kapalině. Výsledkem odvození je již zmíněná Rayleighova-Plessetova rovnice 2.5.

$$\frac{p_B(t) - p_\infty(t)}{\rho} = R \cdot R'' + \frac{3}{2} \cdot (R')^2 + \frac{2 \cdot \sigma}{\rho \cdot R} + \frac{4 \cdot \mu \cdot R'}{\rho \cdot R} \quad 2.5$$

Rayleighova-Plessetova rovnice se řadí mezi nelineární diferenciální rovnice druhého řádu a řeší se většinou numericky. Rovnice 2.5 se pro některé velmi zjednodušené modely, při zanedbání setrvačnosti, viskózních sil a vlastností plynu upraví do tvaru 2.6.

$$R' = \sqrt{\frac{2}{3} \frac{p_B(t) - p_\infty(t)}{\rho}} \quad 2.6$$

Na následujícím grafu 2.1 je zobrazena modelová situace dynamiky osamocené kavitační bublinky v kapalině, která je vybuzena poklesem tlaku v kapalině pod tlak nasycených par. Hlavní osa y na levé straně představuje poměr okamžitého poloměru bublinky a počátečního poloměru bublinky, osa y na pravé straně představuje tlak nasycených par a buzení, osa x představuje časovou proměnnou. Fialová čára znázorňuje vybuzení bublinky poklesem tlaku v okolní kapalině pod tlak nasycených par, v obrázku vyznačený zelenou barvou. Červená čára je řešením Rayleighovy-Plessetovy rovnice v základním tvaru s použitím numerického modelu pro řešení diferenciálních rovnic s tlumením. Modrá čára je řešením zjednodušeného modelu.



Graf 2.1: Numerické řešení Rayleighovy-Plessetovy rovnice [6]

2.3 Vlivy na chování kavitační bublinky a její stabilita

Rovnice statické rovnováhy a Rayleighova-Plessetova rovnice předpokládá určitá zjednodušení. Ve skutečných pochodech v hydraulických strojích a zařízeních je situace zcela jiná. Bublínek se v kavitační oblasti vyskytuje velké množství a také se vyskytují v blízkosti jiných těles. Vzájemná vzdálenost bublinek nebo vzdálenost bublinky a tělesa může nabýt takové hodnoty, že se bublinka chová jinak, než kdyby byla osamocená. Tlakové pole je ovlivněno a mezi tlaky jednotlivých míst mohou být velké rozdíly. Bublinka a její povrch je při výskytu těchto poruch nestabilní. Spolupůsobením různých vlivů – Bjerknesova síla, Rayleighova-Taylorova nestabilita, tepelné efekty, přenos hmoty fázovým rozhraním, fyzikální vlastnosti okolní kapaliny, přítomnost okolních těles, příp. dalších vlivů - se vývoj

bublínky složitě formuje. Při experimentech se sleduje chování bublinky ve volné kapalině daleko od všech těles – tzv. symetrický případ, nebo v blízkosti těles a ostatních bublinek (pevná tělesa, membrány, bublinky, ...), které chování bublinek silně ovlivňují – tzv. asymetrický případ.

Nejdříve se zaměříme na fyzikální vlastnosti okolní kapaliny. Vazkost kapaliny tlumí kmity bublinky a způsobuje ztráty mechanické energie. S rostoucí viskozitou kapaliny je rychlost změny velikosti bublinky menší – zvětšující se bublina ve viskóznější kapalině naroste do menší velikosti než za jinak stejných podmínek v méně viskóznější kapalině. Nejvíce se tato vlastnost projeví u kolabujících bublin, kdy rychlost fázového rozhraní velmi narůstá. Vazkost tak zpomaluje rychlost zmenšování bubliny. Další vlastností působící na dynamiku bublinky je povrchové napětí fázového rozhraní bublinka – kapalina. Povrchové napětí má vliv na rychlost zmenšování a zvětšování bublinky. Rychlost růstu se snižuje a rychlost zmenšování se zvyšuje. Intenzita růstu bublinky není v průběhu děje stejná, nejvíce ke zpomalování dochází v počáteční fázi děje a s růstem poloměru bublinky vliv povrchového napětí klesá. Největší vliv má ale pravděpodobně stlačitelnost reálných kapalin a to zejména při velkých změnách tlaku, tj. na konci kolapsu bublinky, kdy je ovlivněn tlak v kapalině i v bublince. Stlačitelná kapalina pak při kolapsu dosahuje menší rychlosti než kapalina nestlačitelná a rozdíl může být až o řád odlišný.

Pokud se zaměříme na sdílení tepla, kmity bublinky mohou být sdílením tepla mezi plynným vnitřkem bublinky a okolní kapalinou tlumeny. Při růstu bublinky má být v bublince stálý tlak páry, kapalina se do bublinky vypařuje a teplo se získává z povrchové vrstvy u fázového rozhraní. Ochlazení způsobí změnu hodnoty tlaku nasycených par v blízkém okolí. Naopak při kolapsu pára kondenzuje a teplo se uvolňuje. V blízkém okolí pak teplota poroste. Důsledkem je nárůst tlaku v bublince. Sníží se tak rychlost zmenšování bublinky.

Chování povrchu kavitační bublinky a jeho geometrická stabilita může být vysvětlena na Rayleighově-Taylorově nestabilitě pro kulové rozhraní. Z analýzy Rayleighovy-Taylorovy nestability plyne, že každé zrychlující rozhraní je náchylné k nestabilitě. Bublinka kulového tvaru je nejvíce náchylná na sférické poruchy. Ty nastávají jako důsledek velkých pozitivních hodnot zrychlení a záporné hodnoty rychlosti pro fázové rozhraní v posledním stádiu kolapsu, těsně před novým růstem bublinky. Naopak nejstabilnější je povrch při růstu bublinky blížíci se maximálnímu poloměru. Prvním modelem je kulový tvar bublinky. Druhým modelem je bublinka tvaru dle obr. 2.5 v následující podkapitole, u které se utváří tzv. jet efekt. Mody vyšších řádů se vyskytují hlavně v symetrických případech.

V kapalině, ve které existuje tlakové pole s tlakovým gradientem, působí na kavitační bublinku Bjerknesova síla. Tlakové pole může být přirozené v důsledku proudění, nebo umělé generované akustickou kavitací, kdy je Bjerknesova síla jeden z nejsilnějších účinků na kavitační bublinku. Princip lze vysvětlit na příkladu deterministického tlakového pole v kapalině, které je generované akustickým zdrojem tlaku o určité amplitudě a pro danou harmonickou frekvenci. Zjednodušeně platí, že bublinka o určitém poloměru v daném tlakovém poli o určitém gradientu a frekvenci se bude pohybovat ve směru gradientu (míst s větší změnou tlaku) v případě, že je její velikost menší než rezonanční. Naopak platí, že pokud bude její velikost větší než rezonanční, bude se pohybovat proti směru gradientu (míst s menší změnou tlaku). Popsaný jev je také důvodem shlukování bublinek na některých místech v kapalině. V případě kavitační bublinky v blízkosti pevné stěny je tlakový gradient určité frekvence generován při aktivitě bublinky. Při růstu a kolapsu bublinky, která působí stěnou na kapalinu, dochází k proudění a vzniká tak tlakové pole o určitém gradientu.

2.4 Chování kavitační bublinky - symetrický případ

Z analýzy Rayleighovy-Taylorovy nestability plyne závěr, že většina tvarových nestabilit může být vyšších řádů. Na tomto místě je třeba upozornit, že Rayleighova-Taylorova nestabilita nezahrnuje tepelné efekty, které se ale v reálných procesech vyskytují. Shepherd a Sturtevant prováděli experimenty [7] s kapičkou přehřáté kapaliny v jiné nemísitelné kapalině, na které vznikala bublinka. Pokud povrch bublinky hrubne a je nepravidelný v důsledku nestabilit bublinky, v oblasti přehřátí a nepravidelného zdrsňeného povrchu dochází ke zlepšení přenosu tepla, které je pravděpodobně odpovědné za větší růst bublinky. Shepherd a Sturtevant se domnívají, že míra nestability by mohla být porušena - snížena zvýšením okolního tlaku, protože míra nestability se zvyšuje s rychlostí růstu bublinky. Na fotografiích z experimentu na obr. 2.2 je vidět vývoj v čase 31, 44, 58 μ s po nukleaci pro různé případy bublinek (tmavá místa). Kapička o skutečném rozměru 2 mm je na obrázku transparentní a ohraničená v jiné nemísitelné kapalině.



Obr. 2.2: Vliv tepelných efektů [7]

Pokud se vrátíme k závěru z Rayleighovy-Taylorovy nestability, může u bublinek v důsledku nestability povrchu bublinky nastat změna jejího kulového tvaru a zvlnění povrchu a to dokonce vyšších řádů. A právě v symetrickém a nebo mírně asymetrickém případě se často tyto módy vyšších řádů vyskytují. Bublinka má v počáteční fázi kulový tvar bez deformace nebo s mírnou deformací. Následně bublinka kolabuje a roste tlak, který způsobí její další růst, při kterém už ale tvar bublinky není kulový, je deformovaný a rozhraní je zvlněno. Bublinka se také může na konci kolapsu rozpadnout v oblak velmi malých bublinek. Frost a Sturtevant prováděli experimenty [8] rozpadu bublinek. V uvedeném experimentu hrají roli i zmíněné tepelné efekty. Obr. 2.3 ukazuje fotografie vývoje života kavitační bublinky v glycerinu. Bublinka první zleva je vyfocena před kolapsem a dvě následující po kolapsu (oblak malých bublinek). Skutečné rozměry bublinky jsou 5-6 mm.



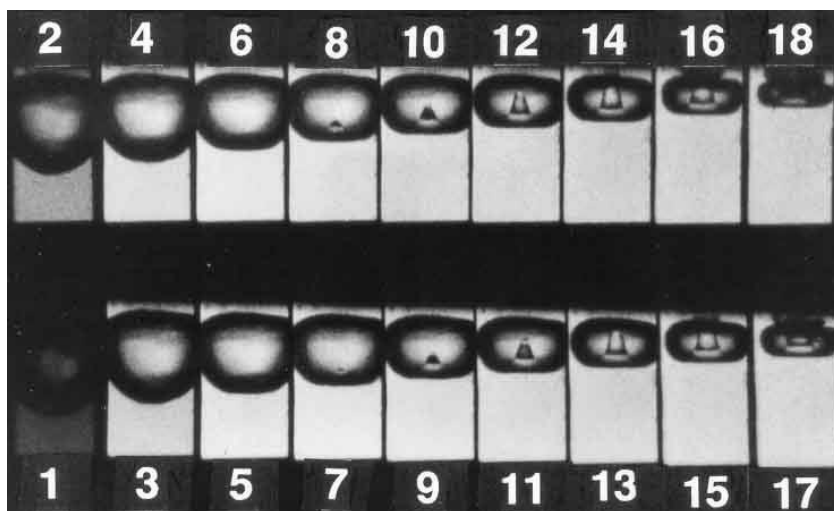
Obr. 2.3: Chování kavitační bublinky – symetrický případ [8]

2.5 Chování kavitační bublinky - asymetrický případ

Asymetrický případ je význačný výskytem jevu „jet effect“¹ (nebo také „microjet“), který je způsoben libovolnou asymetrií, nebo i gravitací. Jet efekt se formuje proti tlakovému gradientu jako druhý mód vlastního tvaru bublinky. Tato práce se zabývá chováním bublinky v blízkosti pevné stěny a proto bude jet efekt vysvětlen na tomto případě. Uvažujme rostoucí bublinku v blízkosti pevné stěny. Ve fázi růstu bublinky dochází v důsledku zvětšování jejího objemu k pohybu okolní tekutiny. Tento pohyb je výrazně ovlivněn stěnou. Vznikají tak rozdíly v rozložení okolního tlakového pole, v oblasti u stěny dochází k poklesu tlaku. Při kolapsu bublinky dochází k deformaci jejího povrchu rychleji na odvrácené straně od stěny než na straně přivrácené ke stěně. V důsledku této nerovnováhy vniká do vnitřku bublinky okolní tekutina a formuje se z ní proud – jet. Proud pokračuje dále do vnitřku bublinky, protíná její povrch na straně blíže stěně a může se dále prodlužovat. Časový vývoj byl zaznamenán například při experimentu [9] na obrázku 2.4. Tomita a Shima generovali

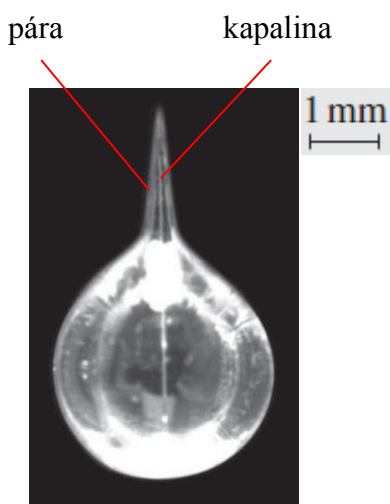
¹ Slovní spojení „jet effect“ a „splash effect“ nejsou v českém jazyce zatím zavedena a ani o nich nelze najít zmínku v korpusu jazyka českého. Po konzultaci s pracovníky Ústavu pro jazyk český AV ČR, v.v.i. (Dr. Prošek, ...) je doporučeno prozatím tato slovní spojení v textu uvádět ve tvaru jet efekt a splash efekt.

kavitační bublinky laserem ve vodě a v blízkosti pevné stěny situované v horní části. Vysokorychlostním fotografováním s intervalem 2 μ s a šířkou snímku 1,4 mm sledovali detaily dynamiky kavitační bublinky pro různé vzdálenosti bublinky od stěny. Na sérii obrázků jednoho z nastavení je zřetelně vidět popsané formování jet efektu středem bublinky směrem ke stěně.

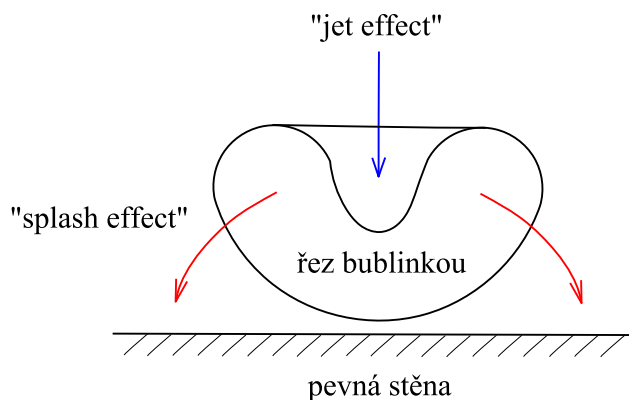


Obr. 2.4: Jet efekt [9]

Pokud bychom sledovali bublinku vzdálenější než při nastavení na obr. 2.4, bylo by vidět další prodlužování jetu. Zároveň se deformuje povrch bublinky „natahováním“ na jet, který je pak tvořen kapalinou obalenou parami bublinky. Složení jetu je na fotografii [10] na obrázku 2.5. Autoři sledovali vliv velikosti tíhového zrychlení na tvorbu jet efektu. Uvedená fotografie byla získána metodou předního osvětlení s adaptivním překrytím a různou expozicí pro bublinku počátečního poloměru 3mm, nastavený rozdíl tlaku v okolní kapalině a tlaku nasycených par 10 kPa a normální tíhové zrychlení.



Obr. 2.5: Složení jetu [10]



Obr. 2.6: Splash efekt

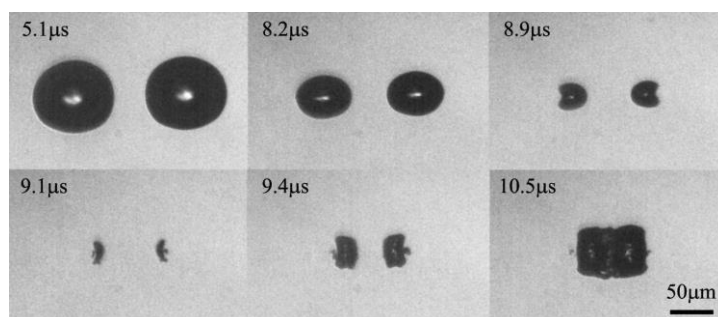
V souvislosti s jet efektem je vhodné popsat i splash efekt, který se ale plně vyvine pouze v případě, kdy je bublinka blízko u stěny. Na obrázku 2.6 je zjednodušeně neproporcionálně znázorněn řez bublinky v blízkosti pevné stěny, u které se ve směru modré šipky vyvíjí jet efekt. Červené šipky představují pohyb vrchní části bublinky ohraničené toroidální plochou, která vznikla rozdělením původně kulového povrchu jet efektem. Tímto pohybem se stěna bublinky přemísťuje k pevné stěně a při následném kontaktu působí na tuto stěnu silou. Následným doprovodným jevem může být radiální proudění na osu bublinky. Popsaný jev se nazývá splash efekt.

Na experimentu [9] bylo ukázáno chování kulové bublinky v blízkosti pevné stěny. Na následujícím obrázku je pouze pro doplnění a bez upřesňujících informací o provedení experimentu uveden případ jiné než kulové bublinky. Benjamin a Ellis [11] na obr. 2.7, ukazují, že se bublinka v blízkosti stěny může chovat i zcela specifickým způsobem. Autoři generovali polokulovou bublinu přímo na stěně. Bublinka se přilepila na stěnu a procházela speciální formou „koláčovitého“ kolapsu. V takovémto případě je obtížné sledovat jet efekt a splash efekt.



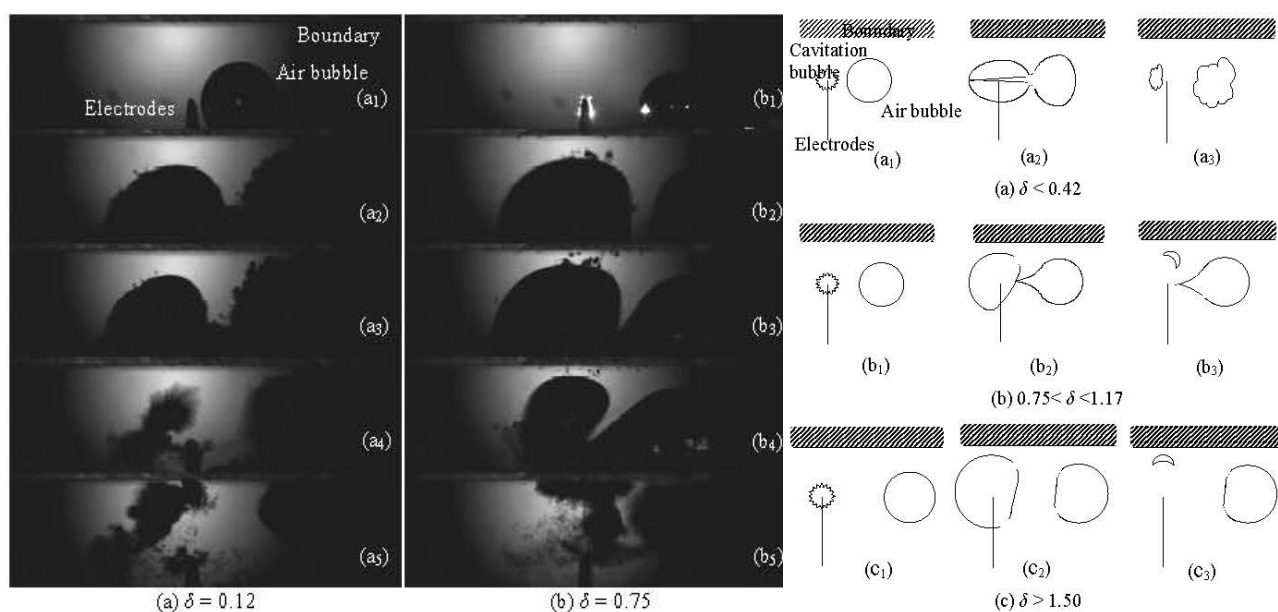
Obr. 2.7: Kolaps polokulové bublinky v blízkosti pevné stěny [11]

Nachází-li se bublinka v blízkosti jiných těles než je pevná stěna, její chování je existencí těchto těles rovněž ovlivněno a i mezi nimi dochází k vzájemné interakci. Studuje se například interakce mezi dvěma kavitačními bublinkami. Důvodem je sledování silového působení mezi bublinkami v různých kapalinách pro případ, kdy je mezi ně vložena tenká membrána. Na obrázku 2.8 je vzorek vývoje interakce dvou laserem generovaných bublinek ve vodě pro vybranou vzájemnou vzdálenost [12]. Je pro ně znatelná deformace a přibližování, formace jet efektu a spojení v průběhu druhého kolapsu.



Obr. 2.8: Chování dvojice bublinek [12]

Kavitační bublinky se často vyskytují spolu se vzduchovými bublinkami například v provzdušněné vodě. Na obrázku 2.9 je vybráno jedno nastavení z experimentu, studujícího interakci kavitační bublinky, vzduchové bublinky a pevné stěny [13]. Xu, Bai a Zhang v tomto nastavení generují kavitační bublinku výbojem mezi elektrodami jiskřiště a vzduchovou bublinku vytvářejí injekční stříkačkou nanesením na voskovanou bavlněnou nit. Pevná stěna je situována v horní části, elektrody mírně nalevo od středu a vzduchová bublinka mírně napravo od středu. Na uvedeném obrázku je neměnná vzdálenost středu kavitační bublinky od stěny (1,25násobek průměru kavitační bublinky). Vzdálenost vzduchové bublinky od kavitační bublinky je dána poměrem $\delta = d/R$, kde d je vzdálenost stěny vzduchové bublinky od jiskřiště a R je poloměr bublinky. Na nákresu v pravé části obrázku jsou naznačeny vzory chování pro vybrané nastavení, na kterých je zřetelný jet efekt. Pokud je vzduchová bublinka blíže kavitační bublince než stěna, kavitační bublinka interaguje se vzduchovou bublinkou a stěna má velmi malý vliv. Při zvětšování vzdálenosti vzduchové bublinky od kavitační bublinky zaujímá stále větší vliv pevná stěna a vliv vzduchové bublinky je minimální.

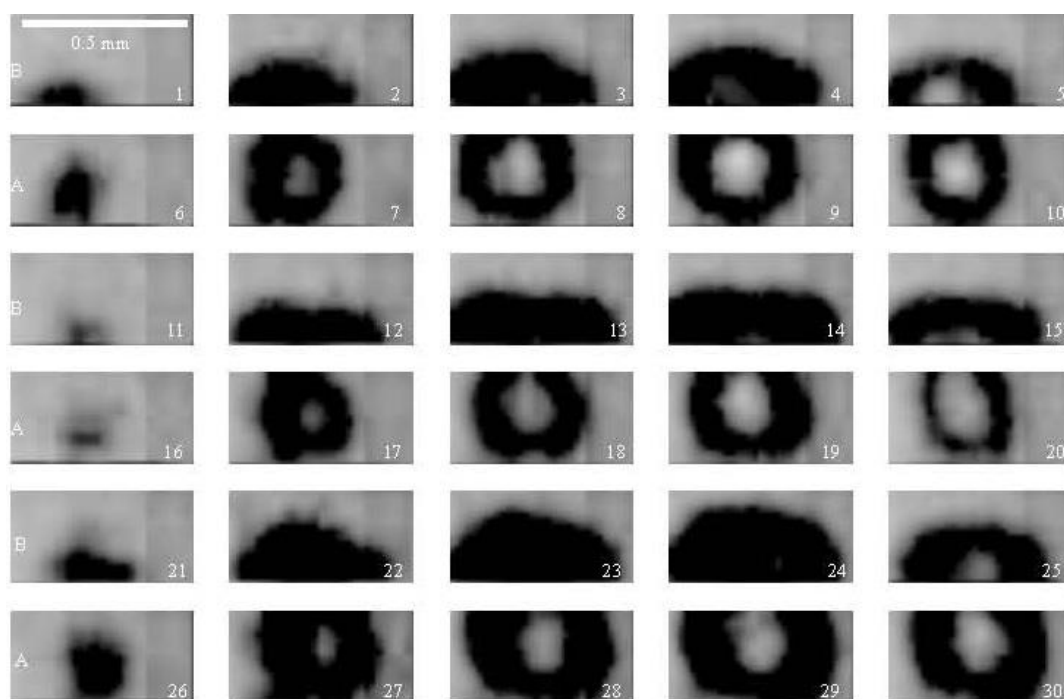


Obr. 2.9: Vzájemná interakce kavitační bublinky, vzduchové bublinky a stěny [13]

2.6 Způsoby generace kavitačních bublin

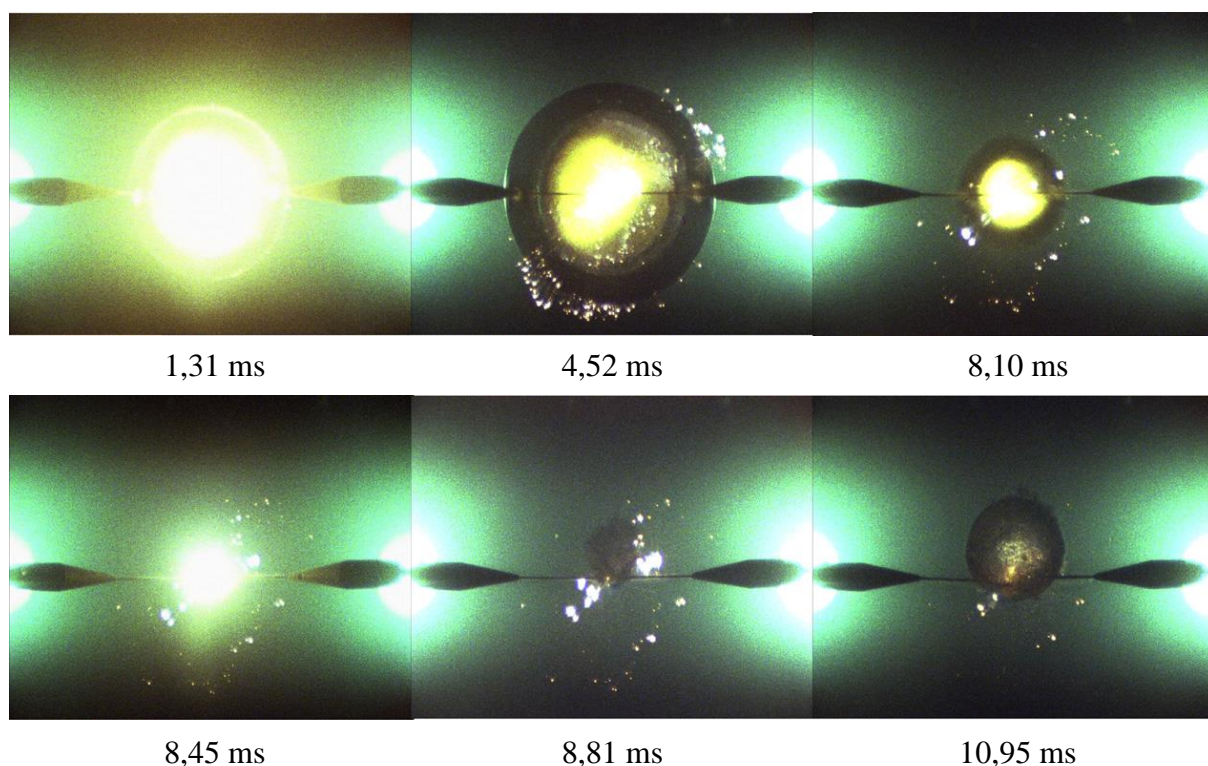
Kavitaci rozdělujeme na přirozenou, vyskytující se při provozu strojů a zařízení, a umělou, generovanou například za účelem čištění povrchů. Kavitační bublinky se v experimentech generují uměle jako oblasti s velkým počtem bublinek, nebo oblast s jednou osamocenou bublinkou. Principy generace mohou být tlakové a energetické. Mezi tlakové

principy patří hydrodynamická kavitace a akustická kavitace. Vznik hydrodynamické kavitace lze popsat na Bernoulliho rovnici. Tlaková energie se transformuje na rychlostní, dochází k poklesu tlaku v kapalině pod tlak nasycených par a přitom vznikají kavitační bublinky. To je například princip vzniku kavitace ve skleněné Venturiho trubici, kterou lze použít pro porovnání numerické simulace a skutečnosti. Akustická kavitace vzniká poklesem tlaku v kapalině od akustických vln kmitajících povrchů těles. Kmitání je vytvořeno piezoelektrickými a magnetostrikčními měniči. Akustickou kavitační generuje například zařízení pro vibrační metodu testování odolnosti materiálu proti kavitační erozi. Oba tlakové principy jsou vhodné pro získání kavitační oblasti s velkým počtem bublinek. To může být při vizualizaci probíhajících procesů a při studiu dynamiky jediné bublinky nevýhodou. Velkou výhodou těchto metod je ale to, že se co nejvíce přibližují reálnému fyzikálnímu procesu při kavitační, a to poklesu tlaku v kapalině pod tlak nasycených par bez dalších doprovodných efektů, např. vlivu tepla při energetických principech. Akustická kavitace v neproudící tekutině poskytuje další výhodu v tom, že akustické pole může být řízeno ve prospěch dlouhé doby „života“ bublinek. Bai, Xu, Tian a Li v [14] generovali kavitační bublinky akustickým polem z kavitačních jader v deionizované vodě. Cílem bylo získat již uvedené výhodné vlastnosti. V blízkosti stěny pak sledovali chování bublinek. Potýkali se s problémem přesného zaměření bublinky, získali neostře snímky s nezřetelnou hranicí povrchu. Vybraná série snímků jednoho z nastavení je na obrázku 2.10, kde plocha stěny odpovídá spodním stranám snímku. Časový interval mezi jednotlivými snímky je 10 μ s.



Obr. 2.10: Akusticky generovaná kavitační bublinka [14]

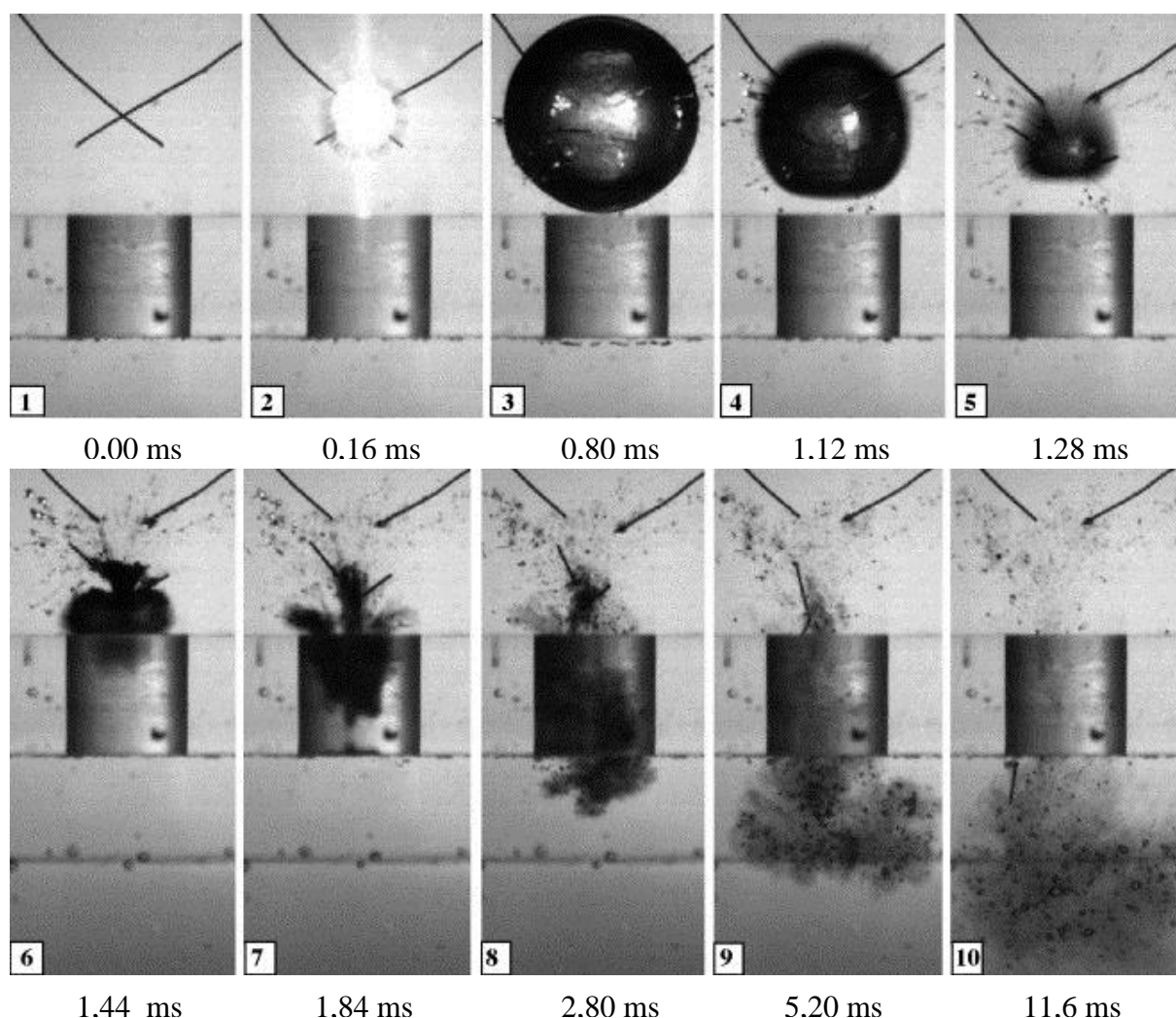
Energetické principy jsou vhodné zejména pro získání jediné bublinky. Patří sem kavitační bublinka generovaná elektrickým výbojem a přechodovým odporem, dále optická kavitace a výjimečně se používá elektrolýza. Prvním způsobem je generace kavitační bublinky elektrickým výbojem v jiskřišti mezi dvěma elektrodami v kapalině. Dodaná elektrická energie způsobí při výboji pohyb nabitých částic a dochází ke srážkám těchto částic s neutrálními atomy či molekulami, které se rozpadají na ionty a elektrony. Látka prochází procesem nazývaným ionizace a výslednou formu hmoty nazýváme plazma. Plazma ohřívá okolní kapalinu, vzniklá pára se formuje v bublinku a její růst probíhá obrovskou rychlostí. Takovýto princip generace použil Buogo a Vokurka v experimentu [15], kde sledovali intenzitu oscilací výbojem generovaných bublin. Na elektrodách napájených z baterie kondenzátorů bylo nastavováno elektrické napětí v rozsahu jednotek kV. Pro různá nastavení bylo dosaženo prvních maximálních rádiusů 12,8 mm až 56,4 mm. Na obrázku 2.11 jsou fotografie jednoho z nastavení experimentu [15], při kterém bylo dosaženo prvního poloměru 51,5 mm. Skvrny na stranách jednotlivých snímků vznikly od osvětlovacích lamp.



Obr. 2.11: Bublinka generovaná elektrickým výbojem [15]

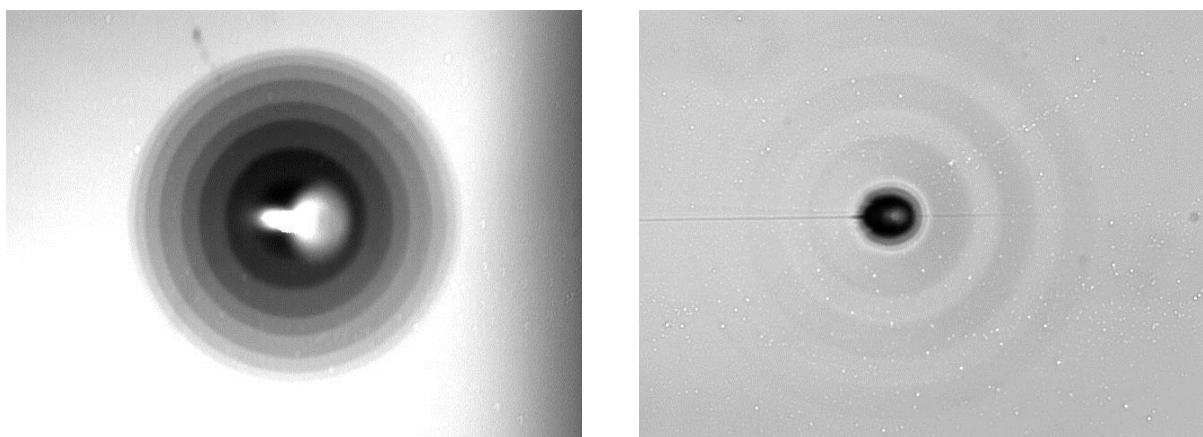
Druhým způsobem využívajícím elektrickou energii je generace bublinky pomocí tepelné energie přechodového odporu. V kapalině jsou umístěny dvě elektrody se společným

dotykem. Na elektrody se přivede elektrické napětí a na společném dotyku vzniká přechodový odpor. Přechodový odpor nabývá velkých hodnot. Nejdůležitější vliv na jeho hodnotu má plocha dotyku, která čím je menší, tím větší je hodnota přechodového odporu. V důsledku velkých hodnot přechodového odporu vzniká velké Jouleovo teplo, kapalina se ohřívá, vzniká pára a bublinka. Uvedený princip používají i Lew, Klaseboer, Khoo [16] za účelem sledování chování bublinky v blízkosti stěny s kruhovým otvorem. Generují bublinku v místě dotyku válcových ploch elektrod, které jsou napájeny z baterie kondenzátorů. Kondenzátory jsou nabíjeny napětím 55 V ze zdroje stejnosměrného napětí. Na obrázku 2.12 jsou snímky z jednoho nastavení, kdy byla vytvořena bublinka o maximálním poloměru 4,12 mm v blízkosti stěny s otvorem o průměru 5 mm.



Obr. 2.12: Bublinka generovaná teplem přechodového odporu [16]

Při optické kavitaci se bublinka generuje fokusováním svazku laserového záření do zvoleného ohniska v kapalině. Energie záření se v ohnisku uvolní, kapalina je ionizována a vzniká plazma vysoké teploty, okolní kapalina se ohřívá, vzniká pára a formuje se v bublinku. Její růst probíhá obrovskou rychlostí. Vzhledem k tomu, že svazek laserového záření má kruhový průřez a průběh intenzity v příčném řezu je Gaussovský, má ohnisko tvar rotačního elipsoidu. Plazma pak přejímá tvar elipsoidu a tvar parní bublinky je proto mírně deformovaný. Müller studoval dynamiku chování laserem generovaných bublin a na obrázku 2.13 jsou uvedeny dva snímky z experimentu pořízené metodou multiexpozice. Principem multiexpozice je skládání více snímků na sebe, které byly získány v po sobě následujících okamžicích. Je tak možné pozorovat vývoj bublinky na jednom snímku, jak tomu je na levém obrázku. Jednotlivé „sféry“ – snímky – jsou získány s časovým odstupem 10 μ s. Nejsvětlejší místo ve středu obrázku je ohnisko s plazmou na počátku. Obrázek na pravé straně představuje záznam změn hustoty v důsledku šíření tlakové rázové vlny vzniklé při kolapsu. Byl tak získán pohyb rázové vlny. Horizontální čára na obrázku je stopa mikrobublin po průchodu laserového paprsku. Mezi jednotlivými snímky je časový interval 50 ns.



Obr. 2.13: Bublinka generovaná laserem [18]

Nevýhodou energetických principů je existence tepelného ovlivnění. Při větší teplotě je tlak nasycených par v bublince větší a poloměr bublinky je tak menší než u neovlivněné bublinky. Menší bublinka prochází rychlejšími změnami, její vlastní frekvence je vyšší a i rychlost kolapsu je vyšší. Proto se chová agresivněji než bublinka větší.

2.7 Kavitační poškození povrchů

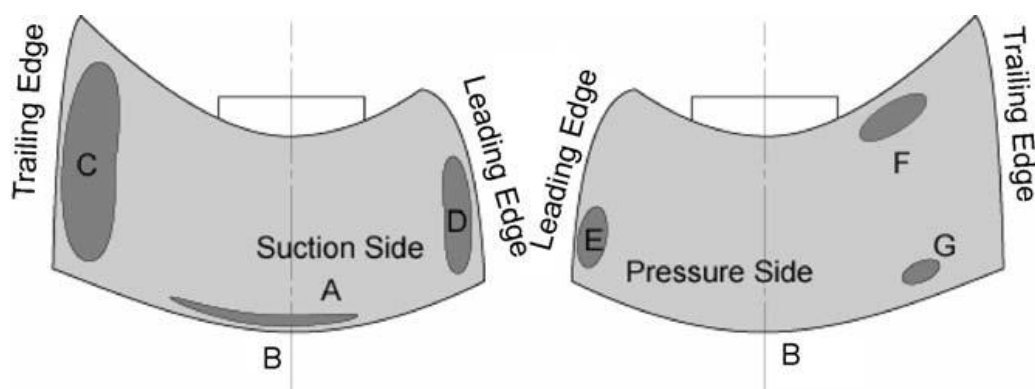
V hydraulických strojích a zařízeních vznikají kavitační bublinky v blízkosti stěn obtékaného profilu. Jak již bylo zmíněno, kolaps bublinky nepříznivě působí na materiál strojních částí, narušuje ho, dochází k erozi. Hlavními zdroji poškození jsou: 1. rychlý proud tekutiny středem bublinky ve směru stěny – jet efekt (typicky pro bublinky ve střední vzdálenosti od stěny); 2. úder deformovaného povrchu bublinky po jet efektu a následné proudění u stěny – splash efekt (typicky pro bublinku v kontaktu se stěnou); 3. rázová vlna (typicky pro bublinky vzdálenější od stěny). Princip eroze je pak takový, že v důsledku uvedených zdrojů dochází u povrchu k opakovanému nárůstu a poklesu tlaku. Tlak způsobuje namáhání materiálu a po určité době dochází k únavě materiálu a jeho plastické deformaci. Deformovaná místa tak mění své mechanické vlastnosti oproti základnímu materiálu. V důsledku toho dochází v další fázi procesu k odtržení deformovaných částí od povrchu. K největší erozi dochází při prvním a druhém kolapsu, další kolapsy mají na erozi již malý vliv.

Kavitační eroze nastává na různých místech obtékaných profilů a závisí i na provozních podmínkách. Tvarově se může jednat o úzkou brázdou, ale i o rozsáhlé oblasti. Příkladem rozsáhlého poškození je obrázek Francisovy turbíny 2.14 s pohledem na výstup oběžného kola turbíny.



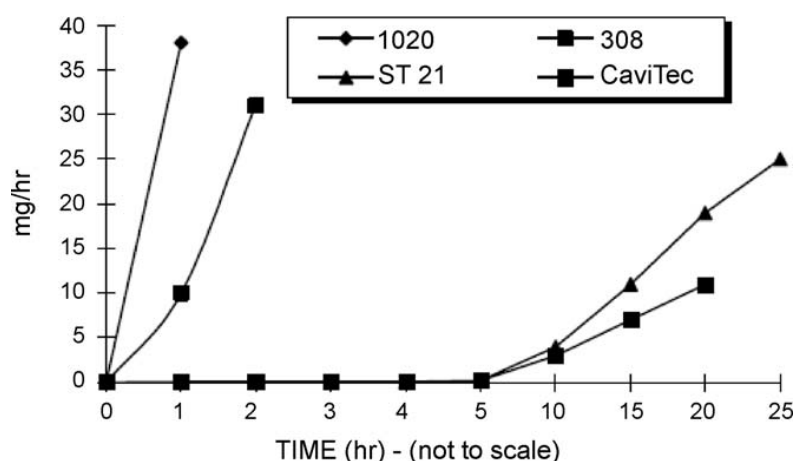
Obr. 2.14: Kavitační eroze na Francisově turbíně [19]

Na obrázku 2.15 jsou uvedena nejexponovanější místa na lopatkách oběžného kola Kaplanovy turbíny. Obrázek nalevo zobrazuje stranu podtlaku a pravý obrázek stranu přetlaku obtékané lopatky. Místo označené „Leading Edge“ je náběžná hrana lopatky a místo označené „Trailing Edge“ je koncová hrana lopatky.



Obr. 2.15: Místa kavitační eroze na Kaplanově turbíně [19]

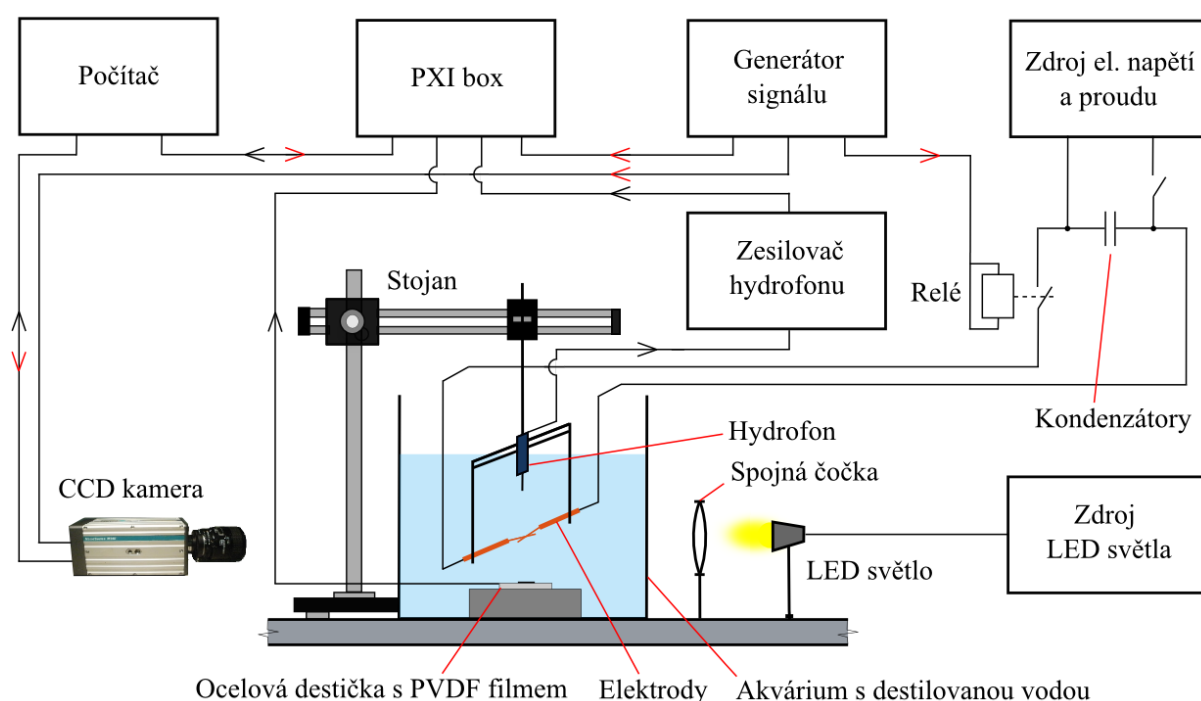
Výzkum se zaměřuje na testování odolnosti různých materiálů proti kavitační erozi. V oboru hydraulických strojů jsou to zejména materiály, které se pro zvýšení odolnosti nebo jako opravný materiál navažují na exponovaná místa obtékaných profilů. Jedna z testovacích metod je i vibrační metoda. Vzorek zkoumaného materiálu se vystavuje aktivitám bublinek generovaných například magnetostrikčním ultrazvukovým měničem. Sleduje se úbytek hmotnosti vzorku v závislosti na době působení měniče pro zvolené nastavení (druh kapaliny, teplota, ...). Představu o výsledku testu poskytuje graf 2.2 z [20]. Protože se tato diplomová práce nezabývá uvedenou tematikou, nebude proveden podrobný popis nastavení testu. Graf ukazuje kumulativní úbytek hmotnosti vzorku při vibrační metodě pro uhlíkovou ocel AISI 1020, nerezovou ocel AISI 308 a speciální slitiny ST 21 a CaviTec. Z obrázku je zřejmé, že obě speciální slitiny podléhají erozi až po určité době – tzv. inkubační době. Poté dochází k ubývání materiálu, které je ale pozvolnější než u oceli AISI 1020 a AISI 308.



Graf 2.2: Kumulativní úbytek hmotnosti různých materiálů při vibrační metodě [20]

3 EXPERIMENTÁLNÍ SESTAVA

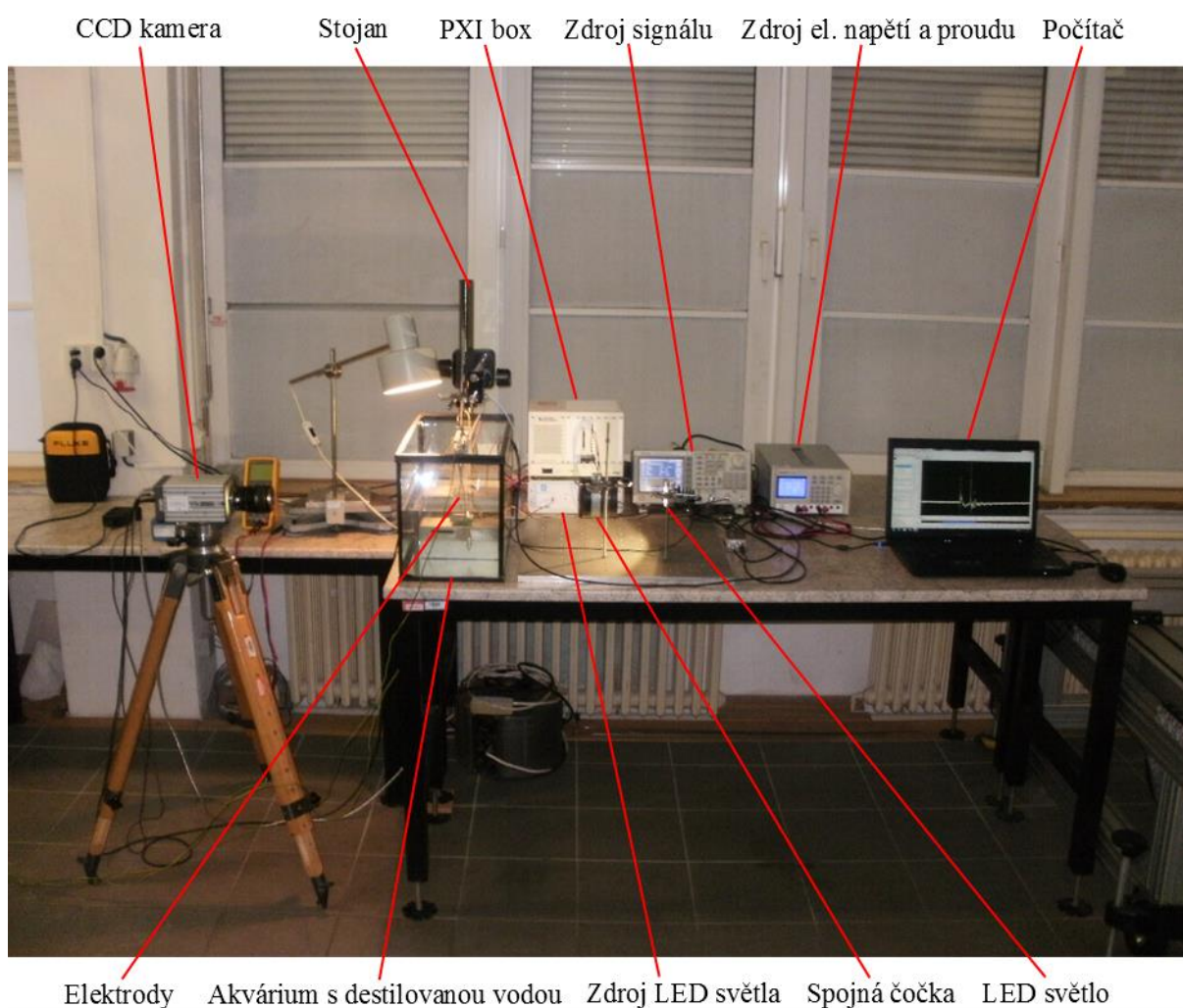
Hlavním cílem této diplomové práce je vyhodnotit interakci kavitační bublinky s pevnou stěnou pro různé vzory chování kavitační bublinky. Wang a Chen [21] provedli měření účinku bublinky na pevnou stěnu. Elektrickým výbojem generovali bublinky v různé vzdálenosti od blízkosti pevné stěny, na které byl připevněn senzor zatížení – PVDF film a celé měření filmovali CCD kamerou. Zvoleným přístupem k řešení experimentálního úkolu této diplomové práce bylo měření silového účinku aktivity bublinky na PVDF film, podobně jako provedli Wang a Chen. Na obrázku 3.1 a 3.2 je experimentální sestava měření, která měla oproti sestavě Wang a Chena několik odlišností. Bublinky se v našem případě generovali teplem přechodového odporu a navíc se měřil tlak v kapalině pomocí hydrofonu.



Obr. 3.1: Experimentální sestava

Hlavní částí experimentální sestavy je PVDF film přilepený na ocelové destičce. Destička je umístěna u dna skleněného akvária naplněného destilovanou vodou. Nad PVDF filmem je nosná konstrukce nesoucí elektrody pro generování kavitačních bublinek a hydrofon pro měření tlaku v kapalině. Nosná konstrukce je polohovatelná pohyblivou konzolí stojanu. Aktivita kavitační bublinky je filmována stínovou metodou CCD kamerou. Pro osvětlení je použito LED světlo soustředěné do oblasti PVDF filmu spojnou čočkou. Každé měření začíná vysláním signálu generátorem signálu k relé, CCD kameře a PXI boxu. Signál vysílaný k CCD kameře slouží ke spouštění kamery, je taktovací, udává frekvenci a počet filmovaných

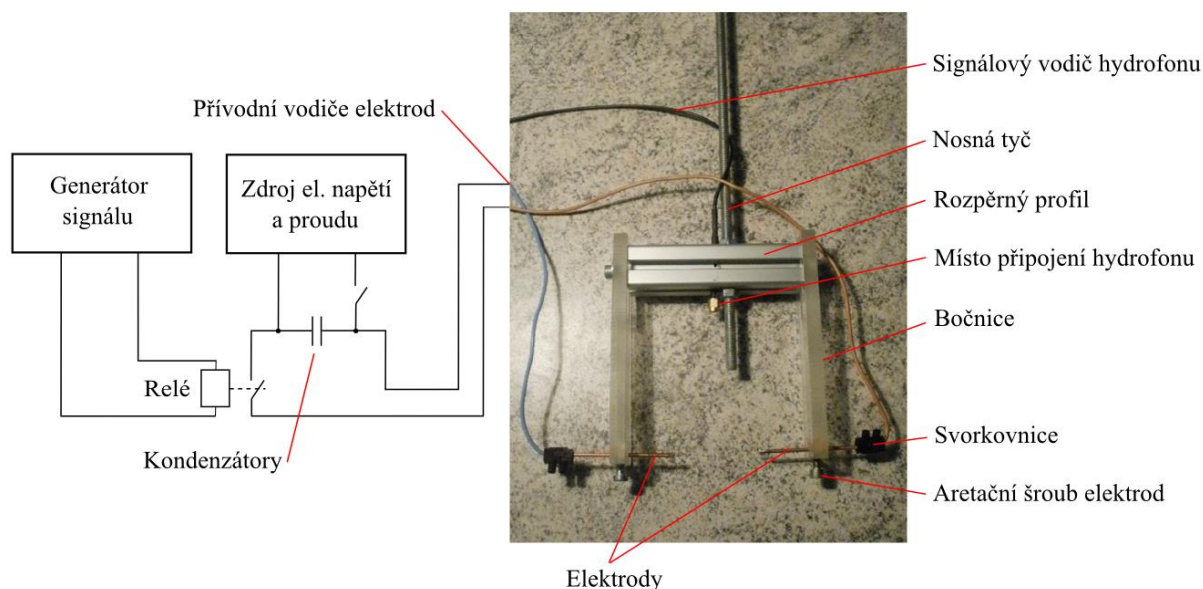
snímků. Signál vedený k oscilografické kartě PXI boxu je spouštěcí pro měření signálu z PVDF filmu a hydrofonu. Signál přivedený na relé spíná obvod generování bublinky. Obvod je tvořen kondenzátory nabíjenými ze zdroje elektrického napětí a proudu, spojovacími vodiči a elektrodami. Po sepnutí se v místě dotyku elektrod vygeneruje bublinka. Bublinka prochází životním cyklem, vznikají doprovodné jevy jako je jet efekt, splash efekt a rázová vlna. Na PVDF filmu a hydrofonu vzniká signál úměrný působení od těchto jevů. Hydrofon snímá tlak v kapalině a zaznamená tak rázovou vlnu. PVDF film snímá kombinované působení od všech jevů. Signál z hydrofonu je před přivedením na vstup oscilografické karty PXI boxu upraven na zesilovači, signál z PVDF hydrofonu je přiveden na oscilografickou kartu přímo. Signál je digitalizován a odeslán do počítače. Snímky z CCD kamery jsou rovněž odesílány do počítače. Na počítači jsou nainstalovány programy pro ovládání a nastavení CCD kamery a PXI boxu. Datový tok je na obrázku znázorněn černými šipkami a tok ovládacích dat je na obrázku znázorněn červenými šipkami.



Obr. 3.2: Experimentální sestava v laboratoři

3.1 Generování kavitačních bublin

Kavitační bublinky se obecně generují způsoby popsanými v kapitole 2.6. Pro experiment v rámci diplomové práce byl použit způsob generace tepelnou energií přechodového odporu dotýkajících se elektrod. Vzniklým Jouleovým teplem se kapalina ohřívá a vzniklá pára pak vytváří kavitační bublinku. K tomuto účelu byla vytvořena sestava znázorněná na obrázku 3.3 s fotografií detailu nosné konstrukce.



Obr. 3.3: Elektrický obvod a nosná konstrukce elektrod

Nejdůležitější částí sestavy je obvod se dvěma paralelně zapojenými kondenzátory 84NK5M výrobce NIPPON CHEMI-CON o kapacitě 4700 μF a maximálním provozním napětí 63 V. Z těchto kondenzátorů je „napájen“ přechodový odpor dotýkajících se konců elektrod. Spínání obvodu je zajištěno elektromagnetickým relé, které spíná na impulz ze zdroje signálu. Popsané tvoří hlavní obvod sestavy. Vedlejší obvod má společné již uvedené kondenzátory, ale je připojen přes spínání na zdroj elektrického napětí a proudu. Vedlejší obvod slouží pro nabíjení kondenzátorů při rozpojení hlavního obvodu. Velikosti nastaveného napětí na zdroji a po nabití na kondenzátorech určují energii akumulovanou v náboji kondenzátoru. Při předpokladu úplného nabití a lineárního dielektrika je energie daná vztahem

$$W = \frac{1}{2}CU^2 \text{ [J]}, \quad 3.1$$

kde C [F] je kapacita kondenzátoru a U [V] je napětí na elektrodách kondenzátoru. Tato energie je pak řídicí veličinou velikosti generované bublinky.

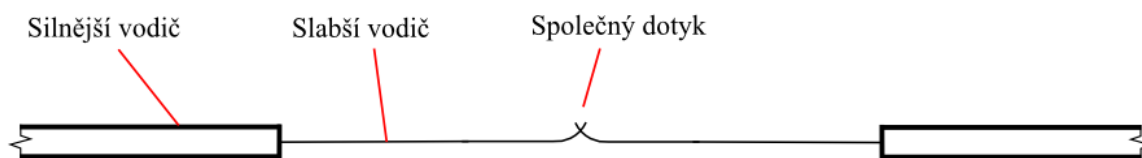
Nosná konstrukce elektrod sestává z ocelové závitové nosné tyče pro upevnění do stojanu, nesoucí rozpěrný hliníkový profil, na který jsou pomocí šroubů připevněny dvě bočnice z polymeru PMMA. V bočnicích jsou vyvrtány z boku průběžné otvory, které slouží jako posuvová dráha elektrod, a kolmo na ně ze spodní strany bočnic také otvory se závitů pro aretační šrouby, které v dráhách při měření elektrody aretují. Konstrukce nese také hydrofon, v rozpěrném profilu je otvor pro signálový vodič hydrofonu. Obě elektrody jsou tvořeny dvěma měděnými vodiči o průměru 3 mm a 0,19 mm. Silnější vodič tvoří nosnou část pro slabší vodič. Konce silnějšího vodiče byly upraveny na hladké rovnoběžné plochy, do jedné z těchto ploch byl vyvrtán otvor průměru 0,8 mm a hloubky 10 mm. Tento otvor slouží pro připájení slabšího vodiče. Dotýkající se konce slabších vodičů elektrod jsou pak činnou částí při generaci bublinek. Druhý konec silnějšího vodiče elektrody je spojen přes svorkovnici s přívodním vodičem hlavního obvodu.

Prvním metodou vytváření dotyku elektrod pro přechodový odpor bylo nastavení na obrázku 3.4. Elektrody jsou v jedné rovině a jejich konce se protínají v bodu. Dotyk byl zajištěn pomocí mírného předepnutí.



Obr. 3.4: První metoda vytváření dotyku elektrod

Při takto vytvořeném dotyku docházelo z důvodu geometrického omezení k „upalování“ dlouhých kusů slabšího vodiče. Při manipulaci s nosnou konstrukcí také docházelo k posouvání nebo i rozpojení místa dotyku. Hledala se nová metoda. Výsledkem je zdokonalená metoda, kdy jsou elektrody v jedné přímce. Pomocí speciálně upravených kleští se zakulacenými čelistmi o průměru 3 mm se konec slabších vodičů elektrod ohne do tvaru pětiny kružnice. Takto upravené konce se mírným předepnutím spojí v dotyk válcových ploch. Pak již nedochází k tak rozsáhlému „upalování“ konců a hlavně je dotyk lépe definovatelný.

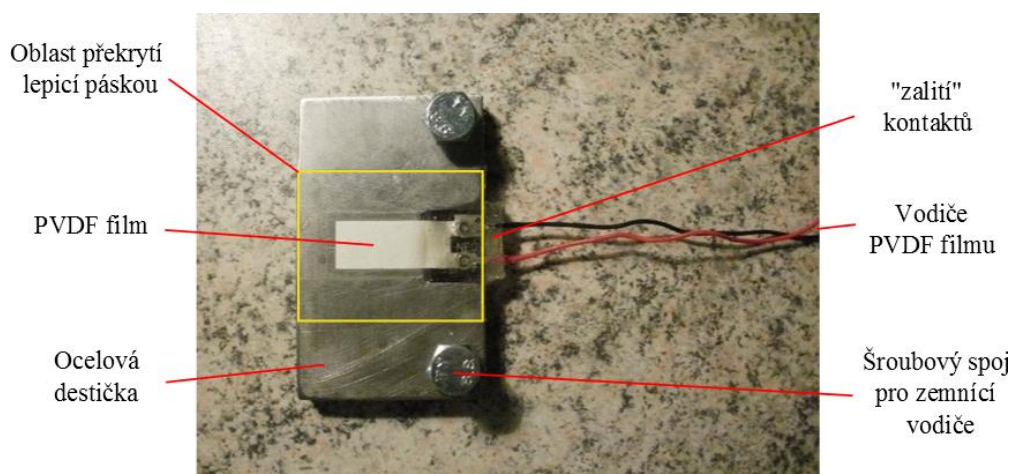


Obr. 3.5: Zdokonalená metoda vytváření dotyku elektrod

Nosná konstrukce je připevněna na pohyblivé konzoli stojanu. Může tak být nastavena libovolná vzdálenost dotyku elektrod od destičky s PVDF filmem. Následuje nabití kondenzátorů připojením zdroje elektrického napětí a proudu na vedlejší obvod, odpojení vedlejšího obvodu a spojení hlavního obvodu pomocí relé ovládaného z generátoru signálu. Kondenzátory se vybíjí, přechodový odpor generuje teplo, kapalina se ohřívá a vzniká pára, vytvářející kavitační bublinku. Pak probíhá měření. Pro další cyklus je třeba vytvořit nový dotyk elektrod. Elektrody se v bočnicích odaretují, posunou ke středu a opět zaaretují. Na elektrodách se vytvoří nový „konec“ a pak se mezi elektrodami vytvoří dotyk.

3.2 Ocelová destička s PVDF filmem

PVDF film je senzor zatížení. Jeho detailní popis bude proveden v kapitole 4. Na obrázku 3.6 je PVDF film přilepený na destičku z oceli třídy 11, která byla obrobena tak, aby kontakty filmu bylo možné zaizolovat - „zalít“ do kompaktní vrstvy lepidla, a také aby kontakty filmu nebyly při snímání videa v pohledu. Protože se při experimentu objevily problémy s elektromagnetickým rušením (kap. 3.4), byly v rozích destičky zhotoveny závity pro šrouby, kterými jsou připevněny zemnicí vodiče. Povrch destičky byl upraven hrubým a pak jemným smirkovým papírem a odmaštěn. Těsně před lepením byl povrch destičky potřen aktivátorem povrchu dodávaným spolu s lepidlem. Po 2 minutách od aplikace aktivátoru bylo na povrch destičky nanесeno a do tenké vrstvy pomocí planžety roztaženo ethylkyanoakrylátové lepidlo Henkel Loctite Attak Super Ultra Plastik (pevnost v tahu 2 N.mm^{-2} – 20 N.mm^{-2} dle povrchu). Přitom bylo třeba dbát zvýšené opatrnosti, aby vrstva lepidla byla rovnoměrná a netvořila „vlny“, a aby v lepidle nevznikaly bublinky. Po zaschnutí byl film pro zlepšení ochrany povrchu překryt PVC lepicí páskou TESA tloušťky $50 \mu\text{m}$, což je na obrázku vyznačeno žlutým obdelníkem. Následovalo zalití kontaktů filmu velmi pevným epoxidovým dvousložkovým lepidlem ALTECO 3-TON Epoxy F-05 Clear.



Obr. 3.6: Destička s PVDF filmem

3.3 Použité zařízení

V této podkapitole je proveden popis všech použitých zařízení při měření. Zároveň jsou ale některá z těchto zařízení použita při kalibraci PVDF filmu. Běžná pomocná zařízení a materiály, jako je stojan, stativ kamery, izolační pásky nebo cín na pájení kontaktů, nejsou popisovány.

CCD vysokorychlostní kamera Redlake MotionPro X3

Použitá kamera patří do skupiny digitálních vysokorychlostních kamer s CCD čipem, tvořeným polem elementárních snímačů o velikosti 1280 x 1024 pixelů. Maximální rychlost snímání daného nastavení je omezena vertikálním rozměrem čipu. Pro nejmenší vertikální rozměr 16 pixelů čipu dosahuje rychlosti 64000 snímků za sekundu a naopak při využití plného pole čipu rychlosti 1000 snímků za sekundu. Se zvětšováním oblasti z důvodu přizpůsobení velikosti bublinky rychlost snímání klesá. Kamera je doplněna objektivem Nikon AF Micro-Nikkor 60mm f/2.8D, vhodným pro makrosnímání. Jedná se o objektiv s parametry: ohnisková vzdálenost 60mm; světelnost 2,8; maximální clonové číslo 32; zorný úhel záběru 39,6°; nejkratší zaostřitelná vzdálenost 0,22 m (při měřítku 1:1). Kamera je při měření upevněna na stativu. Start snímání je spouštěn signálem od generátoru signálu Tektronix AFG 3102 propojovacím BNC koaxiálním kabelem. BNC (Bayonet Neill–Concelman) označuje koncovky kabelu - bajonetové rychlospojky. Kamera je spojena s počítačem USB kabelem a datová komunikace je uskutečňována sériovou sběrnici USB 2.0. Ovládání a nastavení kamery v počítači je prováděno v programu Motion Studio.



Obr. 3.7: CCD kamera s objektivem



Obr. 3.8: koncovka BNC a koaxiální kabel [22]

Vysoce výkonné čipové LED světlo Rapp OptoElectronics KSL-1000

Vysoce výkonné LED čipy poskytují intenzivní osvětlení. V důsledku velmi malé plochy čipu a velkého výkonu se čipy velmi zahřívají a je nutné je chladit masivními chladiči. Použitý čip poskytuje bílé světlo a světelný tok 1000 lm. Osvětlení může být pulzní, ovládané vnějším signálem, nebo kontinuální, které je využito při našem měření. Čip upevněný na chladiči je spojen speciálním vodičem s vlastním zdrojem. Při experimentu se snímají kavitační bublinky stínovou metodou. Proto byla mezi LED čip a objektiv CCD kamery vložena čočka, která světlo rozptylované do stran fokusovala do snímaného místa.



Obr. 3.9: LED čip s chladičem a jeho zdroj

Generátor signálu Tektronix AFG 3102

Generátor signálu je zdroj požadovaného elektrického signálu určitých parametrů. Generuje základní průběhy (sinus, cosinus, trojúhelník, ...), ale i libovolný průběh z paměti generátoru. V experimentu používáme pouze signál tvaru pulzů. Pro pulzy lze nastavovat frekvenci (1 mHz – 50 MHz), amplitudu (pro výstupní odpor 50 Ω : 20 mV_{p-p} – 10 V_{p-p}; pro otevřený obvod: 40 mV_{pp} – 20 V_{pp}, index pp ~ peak-peak znamená rozsah mezi vrcholy), offset, fázový posun, šířku střídy (8.00 ns – 999.99 s) a časovou konstantu signálu (5 ns – 625 s). Generátor má dva výstupní kanály a vstupní a výstupní trigger (spoušť). Dále používáme výstupní trigger, který má formát TTL logiky, tj. logická 1 odpovídá napětí 5V

a logická 0 odpovídá napětí 0V. Propojení s přijímači signálu je provedeno pomocí BNC koaxiálního kabelu.



Obr. 3.10: Generátor signálu

Zdroj stejnosměrného elektrického napětí a proudu GW INSTEK PST-3202

Použitý zdroj stejnosměrného elektrického napětí a proudu patří do skupiny programovatelných digitálních zdrojů. Pracuje jako zdroj konstantního napětí a proměnného proudu, nebo konstantního proudu a proměnného napětí. Při experimentu využíváme zařízení jako zdroj napětí. Poskytuje tři izolované napěťové výstupy, z toho dva v rozsahu 0 – 32 V a jeden v rozsahu 0 – 6 V. Rozlišení všech výstupů je 10 mV, chyba z rozsahu je menší než (0,05% + 20mV) a při běžných teplotách je zdroj teplotně téměř nezávislý. Maximální možný dodávaný výkon je 158 W. Propojení se spotřebičem je pomocí kabelů s banánky.

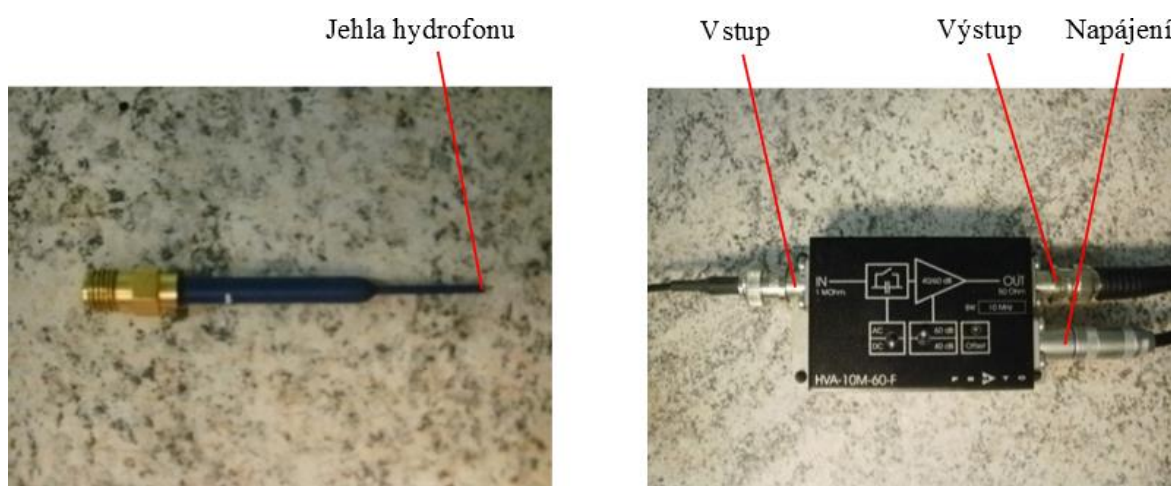


Obr. 3.11: Zdroj stejnosměrného elektrického napětí a proudu

PVDF hydrofon RP Acoustic 19 s, zesilovač signálu hydrofonu Fempto HVA-10M-60-F

PVDF hydrofon používaný v experimentu patří do skupiny dynamických piezoelektrických vysokofrekvenčních jehlových hydrofonů. Měří tlak v daném bodě kapaliny. Piezoelement snímače - folie z polymeru polyvinylidenfluoridu PVDF je umístěna na špičce jehly průměru 1 mm. V důsledku piezoelektrického jevu se při zatížení piezoelementu tlakem na jeho elektrodách generuje elektrický náboj. Parametry hydrofonu

jsou: doba náběhu signálu 150 ns; frekvenční pásmo 1 kHz – 3 MHz; rozsah 0 Pa – 1 MPa; citlivost 29 mV/MPa; přesnost $\pm 15\%$; teplotní interval použitelnosti 10 °C – 35 °C. Přenos signálu je koaxiálním kabelem od výrobce o délce 1,5 m se šroubovací koncovkou pro hydrofon a BNC koncovkou pro zesilovač signálu. Podrobnější pohled na piezoelektrický jev a související vlastnosti měřidel je proveden v kapitole kalibrace PVDF filmu. Výstupní signál piezoelektrických snímačů je silně ovlivněn svodovými odpory a kapacitami senzoru, kabelu a vstupu do dalších částí měřicího obvodu (např. PXI box). Elektrický náboj snímáče je proto upraven na zesilovači signálu. Použitý zesilovač signálu hydrofonu má vstup pro proudový signál hydrofonu (AC/DC – střídavý/stejnoseměrný), vstup pro napájení a výstup pro napěťový signál k dalšímu zpracování. Parametry zesilovače jsou: vstupní impedance 1 M Ω ; doba náběhu 35 ns; šířka DC pásma je dána dolní pásmovou propustí 10 MHz, tj. pásmo 0 Hz - 10 MHz; výstupní napětí $\pm 3,5$ V; výstupní impedance 50 Ω ; zesílení 40/60 dB (100/1000 násobné) určuje vstupní rozsah. Výstup ze zesilovače je k dalšímu zpracování veden koaxiálním kabelem na oscilografickou kartu NI PXI 5105.



Obr. 3.12: PVDF hydrofon a zesilovač signálu PVDF hydrofonu

PXI box NI (National Instruments) PXI-1033, oscilografická karta NI PXI-5105

Základem PXI boxu je pevné šasi obsahující sloty pro vkládání zásuvných měřicích karet (modulů). Další funkcí PXI boxu, zajišťovanou vestavěným řadičem, je vzájemná komunikace mezi jednotlivými sloty navzájem pomocí sběrnic. Dále pak mezi sloty a počítačem, protože se jedná o zařízení poskytující i vytvářející dálkové ovládání aplikací. Většina parametrů sběrnice je dána PXI standardem. PXI standard je založen na sběrnici PCI (PXI – PCI eXtensions for Instrumentation), u které byla přidána synchronizační sběrnice a speciální software. Celé zařízení, včetně měřicích modulů, pracuje jako systém reálného času. Použitý PXI box má 5 slotů. Na obrázku jsou zřetelné dva obsazené sloty. První modul

zleva nebyl při měření použit. Druhý, už použitý modul je oscilografická karta, která nahrazuje klasický osciloskop. Obsahuje elektrické obvody osciloskopu, ale konečné zpracování signálu je provedeno počítačem. Její parametry jsou: počet kanálů 8; 12 bitový A/D převodník (digitizér); maximální vzorkovací frekvence 60 MS/s; frekvenční pásmo 0 Hz – 60 MHz; vstupní impedance 50 Ω nebo 1 M Ω ; rozsah napětí 50 mV_{pp} až 30 V_{pp} (pp ~ peak-peak); citlivost max. 7,3 mV a min. 12,2 μ V; vnitřní paměť 512 MB. Kanálové vstupy mají koncovku SMB (SubMiniature version B). Komunikace s počítačem je pomocí karty NI ExpressCard 8360. Karta je zasunutá na zadní straně PXI boxu. Vede od ní datový kabel k počítači a je ukončen kartou pro počítač stejného názvu NI ExpressCard 8360. Nastavení a ovládání PXI boxu v počítači je provedeno v programu LabVIEW SignalExpress 2012.



Obr. 3.13: PXI box



Obr. 3.14: Oscilografická karta [23]



Obr. 3.15: Karta do počítače



Obr. 3.16 SMB koncovka [22]

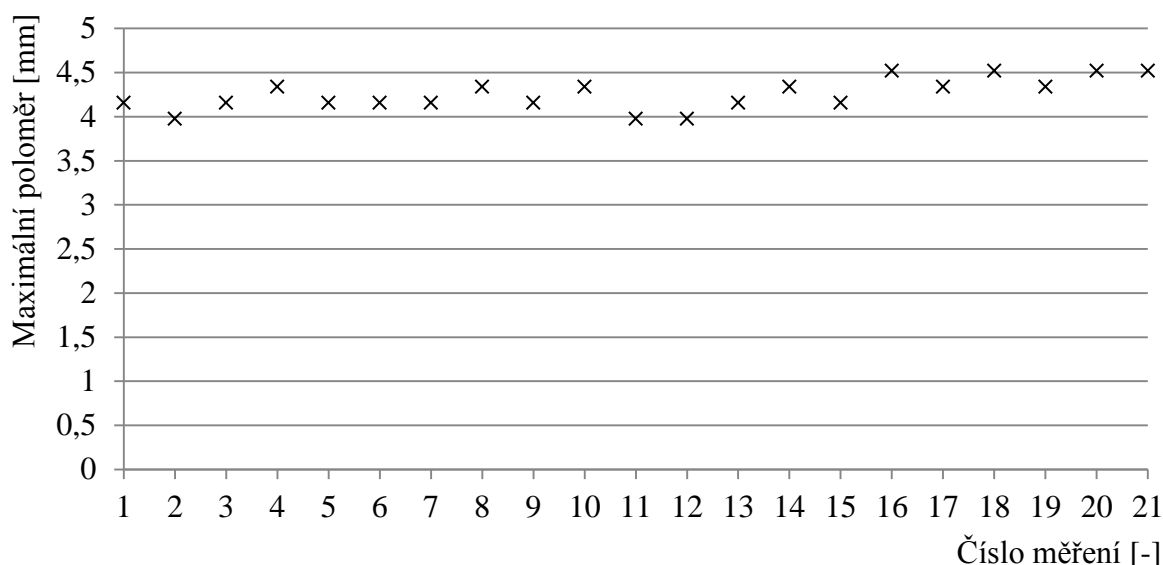
3.4 Omezení a vyplývající parametry experimentu

Před vlastním experimentem bylo nutné otestovat a zhodnotit vliv různých podmínek a současně uvedeného principu generování kavitačních bublinek na výsledky měření. Pro hodnocení vlivu bylo použito základní sestavení používané i při měření – PVDF film, hydrofon a CCD kamera.

Kapalina, vliv teploty kapaliny a vodivosti kapaliny na experiment. Při experimentu byla použita destilovaná voda. Vlastnosti destilované vody jsou definovatelné a měření jsou pak opakovatelná. Teplota kapaliny má vliv na velikost tlaku nasycených par v bublince, který s rostoucí teplotou roste. Pokud vzroste teplota, vnitřek bublinky bude tvořen větším množstvím par kapaliny. Stlačování bublinky by proto vyžadovalo více energie. Ve skutečnosti se imploze zastaví na větším poloměru a bublinka je tak větší než při nižší teplotě, kdy je v bublince menší množství stlačovaných par. Popsaný jev se výrazně projevuje při větších rozdílech teplot. Všechna měření byla provedena v intervalu teploty daném počáteční teplotou destilované vody $19,5^{\circ}\text{C}$ a maximální teplotou na konci měření 22°C . Rozdíl teplot v průběhu měření je malý a změna teploty nemá na měření vliv. Další diskutovanou vlastností byla vodivost kapaliny. Kapalina obklopuje dotýkající se elektrody a tak by vodivost vliv mohla mít. V rámci této práce ale nebyl vliv podrobně zkoumán. Konduktometrem bylo provedeno několik měření specifické vodivosti nepoužité destilované vody ihned po otevření nádoby a hodnota se pohybovala v rozmezí $2,5 - 4,0 \mu\text{S/cm}$. V průběhu měření hodnota vodivosti vzrůstala. Maximální naměřená hodnota specifické vodivosti na konci experimentu byla $11,58 \mu\text{S/cm}$. Domníváme se, že důvodem pro růst vodivosti destilované vody jsou vložené kovové části, produkty z generování bublinek elektrodami a také plyny z okolí vnikající do destilované vody hladinou.

Testování vlivu doby zapojení hlavního obvodu při generaci kavitační bublinky. Bylo zjištěno, že mezní hodnota doby sepnutí je $3,5 \text{ ms}$. Za tuto dobu dochází k přetavení a rozpojení dotyku, přičemž ale nemusí dojít k úplnému vybití kondenzátorů. Nemusí tak být využita celá energie náboje kondenzátoru, ale pouze její část. Po přetavení a rozpojení dotyku se lze setkat s jevem, kdy se oba konce elektrody rozpohybují a mohou o sebe škrtnout. Pak dochází k dodatečným výbojům a vznikají tak další bublinky. Energie kondenzátorů je již menší a proto další bublinky dosahují menších velikostí. Dále byly testovány dvě varianty doby sepnutí relé a to 10 ms a 100 ms . Z průběhu signálů PVDF filmu, hydrofonu a záznamu CCD kamery vyplynulo, že obě testované doby sepnutí nemají na měření vliv.

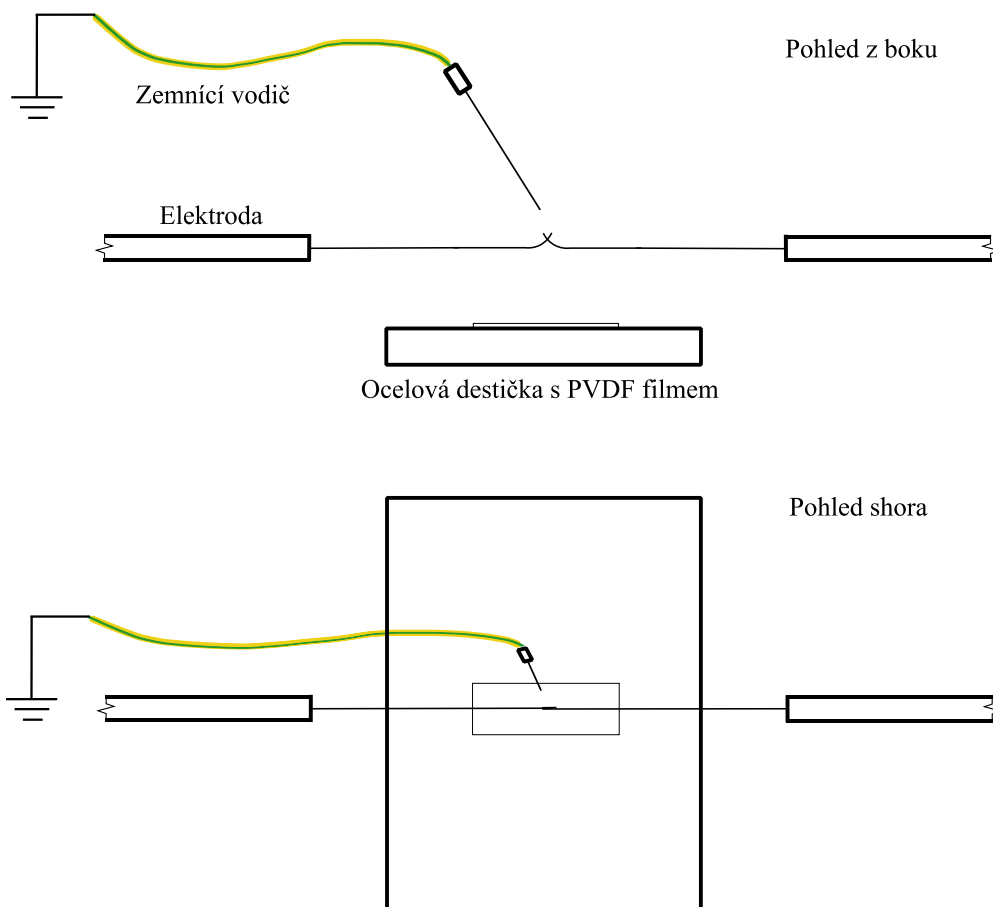
Opakovatelnost generování maximálního poloměru bublinky. Před vlastním měřením byl proveden test opakovatelnosti maximálního poloměru bublinky při konstantním napětí 40 V, 45 V, 50 V a 60 V. Ze snímků CCD kamery byly zjištěny maximální poloměry bublinek. Hodnota maximálního poloměru je proto diskrétní hodnota daná odečteným rozměrem v pixelech a následným přepočtem přes měřítko snímání. Hodnoty maximálního poloměru pro konstantní napětí 40 V jsou uvedeny v příloze P1 a vyneseny v následujícím grafu. Z měření vyplývá, že poloměr bublinky je opakovatelný.



Graf 3.1: Opakovatelnost poloměru

Ochrana povrchu PVDF filmu. Bylo zjištěno, že při extrémním přiblížení činné části elektrod k PVDF filmu může dojít k poškození ochranné folie tvořící PVDF film. Domníváme se, že poškození vznikne v důsledku působení několika efektů, např. roztavenými odpadajícími částmi vodičů při generování bublinky teplem přechodového odporu, které se nepohybují po dostatečně dlouhé dráze v tekutině, na které by zchladly, dále pak teplem kolabující bublinky, nebo soustředěným prouděním tekutiny. Měření se sice při takovýchto extrémních vzdálenostech neprovádí, ale pro lepší ochranu a zabezpečení i před minimálním poškozením a tím možností ovlivnění měření, bylo navrženo překrytí filmu lepicí páskou z PVC.

Elektromagnetické stínění měřidel. PVDF hydrofon je vyroben jako stíněný, ale domníváme se, že může být mírně ovlivněn. Bylo ale zjištěno výrazné ovlivnění signálu PVDF filmu. Byl testován velký počet návrhů odstínění. Není zde prostor pro popis všech a proto pouze pro příklad uvádím přidání tenkého vodiče do blízkosti dotyku elektrod dle následujícího obrázku.



Obr. 3.17: Pohled z boku a shora na jednu z testovaných variant stínění

Ačkoliv došlo k odstínění, nastal zde jev, o kterém částečně pojednává i tato práce. Jedná se totiž o asymetrický případ chování kavitační bublinky. Bublinka je v důsledku jevů popsaných v kapitole 2 přitahována k zemnicímu vodiči a proto je tento způsob odstínění pro náš experiment nevhodný.

Při testech byla ocelová destička s PVDF filmem podložena deskami ze slitiny hliníku. Desky od sebe nebyly odizolovány a byly tak vodivě spojeny. Konečná úprava spočívala v oddělení ocelové destičky od pomocných kovových desek. Mezi ocelovou destičku a podkladové desky byla vložena plastová deska z PMMA. Do ocelové destičky s PVDF filmem byly ve dvou rozích vyvrtány otvory pro šroubové spoje, které sloužily k upevnění měděných zemnicích vodičů z centrálního uzemnění. Každý roh byl vodivě spojen s jiným vývodem centrálního zemnění školní laboratoře. Poslední úprava spočívala v zapuštění kontaktů PVDF filmu do obrobeneho klínového otvoru v desce a „zalití“ těchto kontaktů lepidlem pro izolování od kapaliny. Tyto úpravy odstínily PVDF film.

4 KALIBRACE PVDF FILMU

Kapitola pojednává o kalibraci PVDF filmu. Kalibrace je nutná z důvodu neznámé citlivosti filmu pro druh zatížení, který je podobný zatížení od kolabující bublinky. V kapitole je proveden popis vlastností filmu a možnosti kalibrace, diskuze omezení použití, měření konstanty d_{33} filmu a vlastní kalibrace filmu.

4.1 Popis PVDF filmu a jeho dynamické vlastnosti

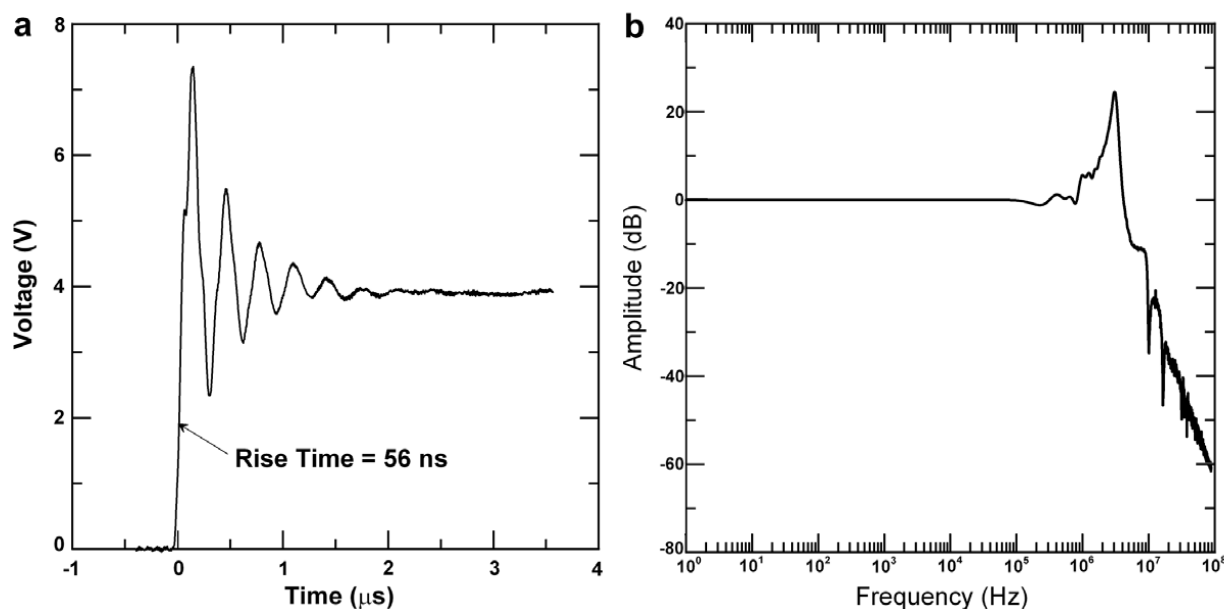
PVDF film je dynamický senzor zatížení pracující na principu přímého piezoelektrického jevu. Při namáhání piezoelektrických materiálů dochází v důsledku deformace k polarizaci jeho krystalů a ke generaci náboje na elektrodách. Velikost náboje odpovídá určitému zatížení a je dána stavbou materiálu a jeho piezoelektrickými konstantami. Piezoelektrickým materiálem v případě PVDF filmu je v této práci již zmíněný polymer polyvinylidenfluorid, u něhož je část polymeru ve formě krystalů (rozhodující pro piezoelektrické vlastnosti) a část ve formě amorfních řetězců proplétajících krystaly. Při měřeních byl použit PVDF film DT1-028K W/TH LEADS/RIVET (výrobce Measurement Specialities Inc.). Základem je tenký substrát PVDF polymeru obdélníkového tvaru o rozměrech 12 mm x 30 mm (tj. činná plocha) a tloušťky 28 μm . Na velké obdélníkové plochy substrátu jsou z obou stran metalizovány stříbrné elektrody. Elektrody jsou vyvedeny na kontakty, na které jsou přinýtovány výstupní vodiče. Substrát s elektrodami je z obou stran pokryt ochrannou vrstvou urethanu, přesahující obdélníkovou činnou plochu. Konečný obdélníkový rozměr je pak 16 mm x 41 mm a tloušťka je 40 μm . Výstupní napětí je v závislosti na zatížení a impedanci obvodu v rozsahu 10 mV – 100 V, teplotní interval použitelnosti je 0 °C – 70 °C, minimální impedance obvodu je 1 M Ω a doporučená impedance obvodu je 10 M Ω .



Obr. 4.1: PVDF film

Výrobce uvádí citlivost PVDF filmu v tloušťkovém módu 0,013 V/N. Dále uvádí, že závislost elektrického napětí generovaného filmem na odpovídajícím silovém zatížení nemusí být lineární. Kapacitance filmu je 1.38 nF. Wang a Chen [21] použili PVDF film, který přilepili na kovovou destičku a jako ochranu před poškozením použili překrytí

polypropylenovou páskou tloušťky 50 μm . V důsledku úpravy filmu ochranným překrytím provedli testování pomocí akustické trubice s plynem. Prvním z testů bylo určení rychlosti odezvy filmu na tlakový pulz (graf a) na obrázku 4.2. Druhým testem bylo určení amplitudo-frekvenční charakteristiky (graf b) na obrázku 4.2.



Obr. 4.2: Dynamika PVDF filmu [21]

Z vyhodnocení vyplynulo pro PVDF film následující. Časová konstanta je přibližně 56 ns. Amplitudo-frekvenční charakteristika je plochá v intervalu 0 Hz – 1 MHz a odezvu tak lze považovat v tomto intervalu za lineární. Citlivost je použitelná do 10 MHz. Rezonanční frekvence filmu je 3,1 MHz. Dalším provedeným testem na stejném vzorku bylo ověření citlivosti upraveného filmu. Wang a Chen zvolili kyvadlový test. Kyvadlo je tvořeno nití, na jejímž konci je přilepena ocelová kulička. Test je navržen pro různě velké ocelové kuličky, mají tak různou hmotnost. PVDF film přilepený na destičce je při testu orientován ve svislé poloze ve směru proti pohybu kuličky, kontakty filmu směřují dolů. Princip a geometrie je podobná jako u testu vrubové houževnatosti Charpyho kyvadlovým kladivem. Kulička kyvadla se nechá volně padat ze známé výšky h_1 . Potenciální energie se mění v kinetickou. V dolní úvratí kulička dopadá na film v čase t_1 rychlostí \vec{v}_1 , silově působí na film a přitom se část kinetické energie přemění na elektrickou energii senzoru. Následně se kulička odrazí v čase t_2 rychlostí \vec{v}_2 a letí po stejné trajektorii ve směru počáteční trajektorie. Protože byla část energie na senzoru transformována, bude potenciální energie kuličky kyvadla v konečné poloze výšky h_2 menší. Při experimentu se zaznamenává signál ze senzoru, který je vyveden přímo na osciloskop a pohyb kyvadla CCD kamerou pro určení výšky h_1 a h_2 . Síla $F(t)$

působící na film není v průběhu časového intervalu $\tau = t_2 - t_1$ konstantní. Je nutné vypočítat její střední hodnotu F_k v tomto intervalu. Impulz síly je definován

$$\vec{I} = \int_{t_1}^{t_2} \vec{F}(t) dt = \vec{F}_k \cdot \tau \quad 4.1$$

a hybnost tělesa je definována

$$\vec{p}_h = \int_{t_1}^{t_2} \vec{F}(t) dt = m \cdot \vec{v} \quad 4.2$$

Platí, že impuls síly je roven změně hybnosti. Z toho plyne vztah pro výpočet F_k , který už je upraven pouze do jednoho směru (při testu horizontální směr)

$$F_k = \frac{1}{\tau} \int_{t_1}^{t_2} F(t) dt = \frac{m}{\tau} (v_1 + v_2) \quad 4.3$$

Vztah pro rychlost je získán matematickými úpravami ze zákona zachování energie. Do relace se položí kinetická energie a potenciální energie dvou odlišných stavů systému a z rovnice se vyjádří rychlost. Vztah pro výpočet rychlosti před dopadem (1) a po odrazu (2) je

$$v_i = \sqrt{2 \cdot g \cdot h_i} \quad i = 1, 2 \quad 4.4$$

Průběh elektrického napětí senzoru, odpovídající síle, také není konstantní. Na osciloskopu se pomocí statistických funkcí zjišťuje střední hodnota elektrického napětí. Z těchto hodnot se lineární regresí získá závislost střední hodnoty elektrického napětí na střední hodnotě síly. Výsledkem kyvadlového testu Wang a Chena byla regresní závislost elektrického napětí senzoru na působící síle ve tvaru $U [V] = 0.013 F [N] - 0.090$.

4.2 Rozbor omezení a volba metody kalibrace PVDF filmu

Při experimentu prováděném v rámci této diplomové práce byl použit PVDF film přilepený na ocelovou destičku a překrytý lepicí páskou. Vrstva lepidla a krycí lepenky by mohla mít vliv na citlivost filmu a proto bylo nutné provést vlastní kalibraci. Pro kalibraci byla zvažována metoda kyvadlového testu. Byla vyslovena domněnka, že existence niti v netuhé vazbě s kuličkou může ovlivňovat pohyb kuličky, nebo průběh dopadu a odrazu kuličky na filmu. Další otázkou byl vliv trajektorie pohybu v souvislosti s dosažením dokonalého dopadu v souvislosti s typem deformace filmu. Proto byla zvolena jiná metoda kalibrace, a to metoda pádu kuličky. Je rovněž jako kyvadlová metoda založena na výpočtu

vycházejícího ze vztahů pro impuls síly a změnu hybnosti. Metoda pádu kuličky se ale z hlediska pohybu a působení kuličky na film jeví bližší aktivitě kavitační bublinky u stěny. Existuje mnoho dalších nezodpovězených otázek, které by bylo vhodné prozkoumat. Pro příklad některé uvedeme. Jaký vliv má téměř bodové stlačení materiálu kuličkou oproti působení na celou plochu? Jaký je vliv stejně velkého zatížení působícího na různých místech? Jaký vliv má téměř bodové působení kuličkou na frekvenční charakteristiku? Jaký vliv má dokonalost přilepení? Jaký má vliv doba od nalepení? Jaká tloušťka filmu by byla optimální?

Následovala diskuze nad metodikou zpracování získaných výsledků. Jak již bylo řečeno, výrobce uvádí, že napěťová odezva filmu na silové zatížení nemusí být lineární. Správné by tedy bylo kalibrovat na závislost maximálního napětí a maximální síly. Maximální sílu není možné zjistit, lze zjistit pouze průměrnou sílu. Kalibrace na průměrnou sílu by byla správná pouze v případě ideálně lineární závislosti napěťové odezvy na silovém působení v celé šířce signálu. Dále byl diskutován vliv časové konstanty. Piezoelektrický snímač se chová jako kondenzátor a při připojení na libovolnou zátěž dochází stejně jako u kondenzátoru k jeho vybíjení. Jedná se o RC obvod, z jehož analýzy plyne časová konstanta přechodového děje $\tau = R_E \cdot C$ [s] a platí, že po době τ dochází k teoretickému poklesu na 63,2% hodnoty původního napětí, po době 3τ k poklesu na 95% původního napětí a po době 5τ k poklesu na 99,3% původního napětí. Oscilografická karta (zátěž filmu) má vstupní odpor 1 M Ω a kapacitance filmu je 1.38 nF.

Výpočtem zjištěná hodnota časové konstanty je $\tau = 1,38 \cdot 10^{-3}$ s. Pokud tedy zatížíme film statickou silou, jeho signál bude za τ zeslaben na 63,2% původní hodnoty. Pokud dojde k úplnému vybití a následnému odlehčení filmu, vznikne na svorkách stejně velké napětí jako na začátku, ale bude opačné polarity. Tento jev se ale vyskytuje i při dynamických dějích. Při době děje o hodně kratší než časová konstanta, sice není vliv jevu tak velký, ale existuje a působí v neprospěch linearity. Doba děje je tedy rozhodující pro metodu hodnocení kalibrace. Při kalibraci byla doba děje v řádu desítek mikrosekund, např. 35 μ s. Při měření byla doba prvního cyklu kavitační bublinky v řádu stovek mikrosekund, např. 550 μ s. Navíc u bublinek různých velikostí platí, že doba jejich „života“ je odlišná. Malé bublinky oproti velkým mají rychlejší cyklus a kmitají na větších frekvencích. Odlišují se tak nejen doby děje při kalibraci a měření, ale i doby mezi jednotlivými měřeními. Z fyzikálního hlediska je pro kalibraci jediný zcela správný přístup porovnávat průměrné elektrické napětí v závislosti na průměrné síle, ale za podmínky totožné doby děje při kalibraci a při měření. Protože jsou ale doby dějů různé, domníváme se, že není možné provést kalibraci tímto způsobem. Byl volen

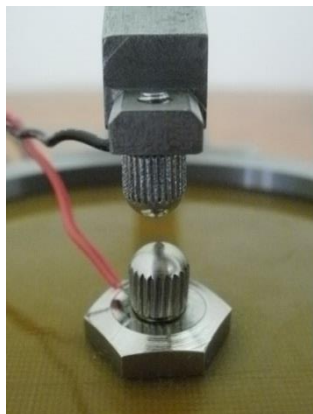
kompromis. Kalibrace je provedena jako závislost maximálního elektrického napětí na PVDF filmu na maximální hodnotě síly. Předpokládáme, že je splněna linearita alespoň pro maximální hodnoty. Pro úplnost byla provedena i kalibrace jako závislost průměrného elektrického napětí na PVDF filmu na průměrné hodnotě síly s předpokladem linearity v celém intervalu signálu.

4.3 Měření piezoelektrické nábojové konstanty d_{33} PVDF filmu

Jednou z otázek diskutovaných v předchozí podkapitole bylo, jaký vliv má poloha zatěžovaného místa na PVDF filmu na hodnotu vygenerovaného náboje při stále stejném zatížení. Možným přístupem k odpovědi na tuto otázku je změřit piezoelektrickou nábojovou konstantu d_{33} PVDF filmu. Vzniklý elektrický náboj, který je úměrný deformaci piezoelementu, má totiž konstantu úměrnosti rovnou právě piezoelektrické nábojové konstantě d_{33} . Piezoelektrická nábojová konstanta je rovna podílu mechanického přetvoření a intenzity elektrického pole, případně podílu plošné hustoty náboje a mechanického napětí. Jednotkou je $C \cdot N^{-1}$, čemuž odpovídá $m \cdot V^{-1}$. První index značí směr, ve kterém je generovaný elektrický náboj piezoelementu orientován. Druhý index značí směr působení mechanického namáhání. Směr (osa) označený číslem 3 je kolmý na plochu filmu. Výrobce udává piezoelektrickou nábojovou konstantu PVDF filmu $d_{33} = 33 \cdot 10^{-12} C \cdot N^{-1}$.

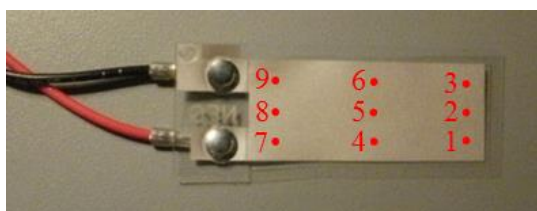
Další důležitou konstantou je piezoelektrická napěťová konstanta g_{33} . Konstanta g_{33} je rovna podílu mechanického přetvoření a intenzity elektrického pole, případně podílu intenzity elektrického pole a mechanického napětí. Udává, jaké elektrické napětí se generuje ve směru 3 působením mechanického napětí působícího ve směru 3. Jednotka je $V \cdot m \cdot N^{-1}$. Konstantu g_{33} je možné dopočítat jako podíl d_{33} a ϵ_{33} , kde veličina ϵ [$F \cdot m^{-1}$] je permitivita materiálu. Výrobce udává piezoelektrickou napěťovou konstantu PVDF filmu $g_{33} = 330 \cdot 10^{-3} V \cdot m \cdot N^{-1}$.

Měření piezoelektrické konstanty bylo provedeno v laboratořích Katedry fyziky Technické univerzity v Liberci. Měřicím zařízením byl piezo d_{33} metr, model ZJ-3C od výrobce Institute of acoustic, Academia Sinica. Piezometr slouží hlavně pro měření konstanty d_{33} různých druhů materiálů a řezů krystalů. Jedná se o přímé měření a princip spočívá ve vložení proměřovaného elementu mezi elektrody, přitlakem kmitajících elektrod na materiál nastavitelnou silou a svedení náboje stejnými elektrodami k měřicím členům. Z tohoto důvodu bylo nutné vodiče PVDF filmu s těmito elektrodami spojit. Na následujícím obrázku je detail elektrod s připevněnými vodiči PVDF filmu.



Obr. 4.3: Elektrody piezo d_{33} metru s připojenými vodiči PVDF filmu

Měření bylo provedeno na rozsahu $1 - 200 \text{ pC} \cdot \text{N}^{-1}$ a s přesností 2% z měřené hodnoty na intervalu $20 - 200 \text{ pC} \cdot \text{N}^{-1}$. Byl proměřen jeden PVDF film. Variantami měření byl případ filmu bez úprav a případ filmu přelepeného lepicí páskou. Měření bylo provedeno na 9 pozicích v pořadí od pozice 1 do 9. Takovýchto měřených cyklů bylo celkem 5.



Obr. 4.4: Proměřované pozice PVDF filmu

Na dalším obrázku je celkový pohled na piezo d_{33} metr s proměřovaným PVDF filmem. Krabice a sešit sloužily pro vypodložení vodičů filmu, zajistila se tak rovinnost činné plochy filmu při měření.



Obr. 4.5: Měření piezo d_{33} metrem

Výsledky byly statisticky zpracovány dle [24]. Vzorový výpočet statistického zpracování pro pozici číslo 1 (první řádek tabulky) a počet měření $n=5$ je uveden zde.

1. Nejistota typu A

Výběrový průměr

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = \frac{30,6 + \dots + 31,3}{5} = 30,92 \cdot 10^{-12} \text{C} \cdot \text{N}^{-1}$$

Standardní nejistota typu A

$$u_A = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} = \sqrt{\frac{(30,6 - 30,92)^2 + \dots + (31,3 - 30,92)^2}{5(5-1)}} \\ = 0,235 \dots \cdot 10^{-12} \text{C} \cdot \text{N}^{-1}$$

Korigovaná standardní nejistota typu A

Protože bylo provedeno pouze 5 měření, je nutné nejistotu typu A korigovat pomocí korekčního koeficientu zjištěného v tab. 1.4, na str. 26 v [24]. Koeficient pro 5 měření je $k=1,4$.

$$u_{Ak} = u_A \cdot k = 0,235 \dots \cdot 1,4 = 0,330 \dots \cdot 10^{-12} \text{C} \cdot \text{N}^{-1}$$

2. Nejistota typu B

Byly zváženy možné dílčí zdroje nejistot. Jediný popsitelný zdroj nejistot je v důsledku nedokonalosti měřicího přístroje. Přístroj měří v intervalu naměřených hodnot s chybou 2% z měřené hodnoty. Je třeba určit maximální hodnotu této nejistoty, která náleží maximální naměřené hodnotě $d_{33 \max} = 31,6 \cdot 10^{-12} \text{C} \cdot \text{N}^{-1}$.

Maximální rozsah odchylek

$$\pm \Delta Z_{\max} = 31,6 \dots \cdot 0,02 = 0,632 \cdot 10^{-12} \text{C} \cdot \text{N}^{-1}$$

Dále je nutné určit standardní nejistotu dílčích zdrojů, v případě tohoto měření pouze jednoho zdroje. Předpokládáme normální rozdělení, pro které je dle podkapitoly 1.8.2 na str. 26 v [24] koeficient $m_r = 2$.

$$u_z = \frac{\Delta Z_{\max}}{m_r} = \frac{0,632 \dots}{2} = 0,316 \cdot 10^{-12} \text{C} \cdot \text{N}^{-1}$$

Standardní nejistota typu B

$$u_B = \sqrt{\sum_{j=1}^m u_{zj}^2} = u_z = 0,316 \cdot 10^{-12} C \cdot N^{-1}$$

3. Výsledek měření

Kombinovaná standardní nejistota C

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} = \sqrt{0,330 \dots^2 + 0,316 \dots^2} = 0,457 \cdot 10^{-12} C \cdot N^{-1}$$

Vypočítaná kombinovaná nejistota je pro pravděpodobnostní interval 68%. Pro větší pravděpodobnostní interval, pro toto měření volený 95%, je nutné kombinovanou standardní nejistotu dle sedmého odstavce kapitoly 1.8 v [24] rozšířit koeficientem $k_u = 2$.

Rozšířená standardní nejistota

$$U = k_u \cdot u_C = 2 \cdot 0,457 \dots = 0,913 \dots \cdot 10^{-12} C \cdot N^{-1}$$

Výsledek je nutné zaokrouhlit. Bylo voleno zaokrouhlování na 1½ platné cifry.

Piezoelektrický koeficient PVDF filmu pozice 1

$$d_{33} = (\bar{x} \pm U)[jednotka] = (30,9 \pm 0,9) \cdot 10^{-12} C \cdot N^{-1}$$

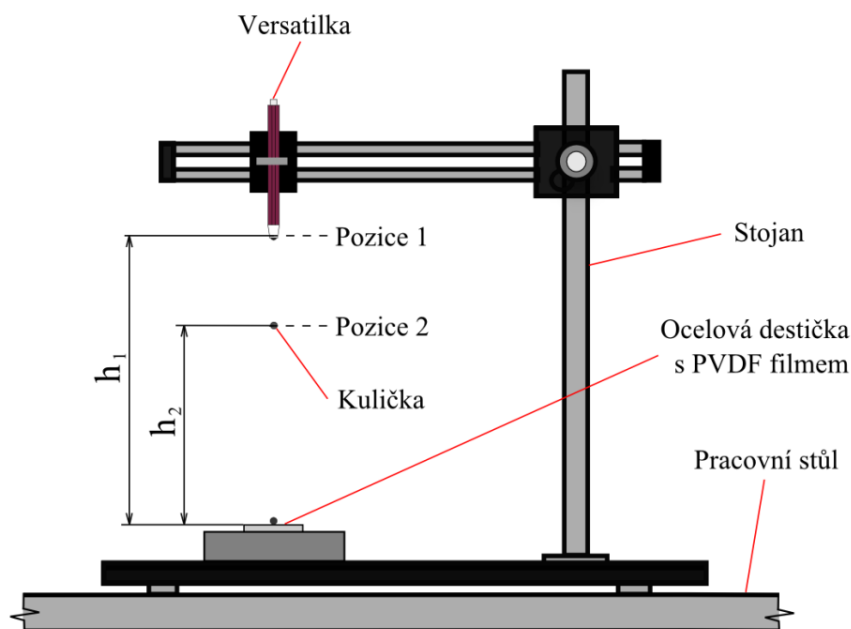
Naměřené hodnoty včetně veličin statistického zpracování jsou uvedeny v příloze 2. Hodnoty statistických veličin nebyly nijak zaokrouhlovány. V tabulce jsou pro přehlednost uvedeny s přesností na tři desetinná místa. Výsledky jsou zaokrouhleny na 1½ platné cifry.

Další měřenou variantou byl PVDF film přelepený lepicí páskou. Jednotlivé naměřené hodnoty opakovaného měření vykazovaly výrazné odchylky a to i o více než 100% hodnot jednotlivých měření. Přelepením filmu tak došlo k výraznému ovlivnění. Metoda měření použitým piezo d_{33} metrem není vhodná pro měření piezometrické konstanty upraveného filmu.

Naměřené hodnoty pro neupravený PVDF film ukazují, že piezoelektrická konstanta d_{33} filmu není v celé činné ploše konstantní. Piezoelektrická konstanta d_{33} je maximální ve středu činné plochy a v krajních oblastech je její hodnota menší. Od hodnoty udávané výrobcem se s uvážením spolehlivostních intervalů liší maximálně o $6,9 \cdot 10^{-12} C \cdot N^{-1}$. V rámci pozic proměřeného filmu se od sebe maximální a minimální hodnoty d_{33} , dané spolehlivostními intervaly, liší maximálně o $8,8 \cdot 10^{-12} C \cdot N^{-1}$.

4.4 Kalibrace PVDF filmu metodou pádu kuličky

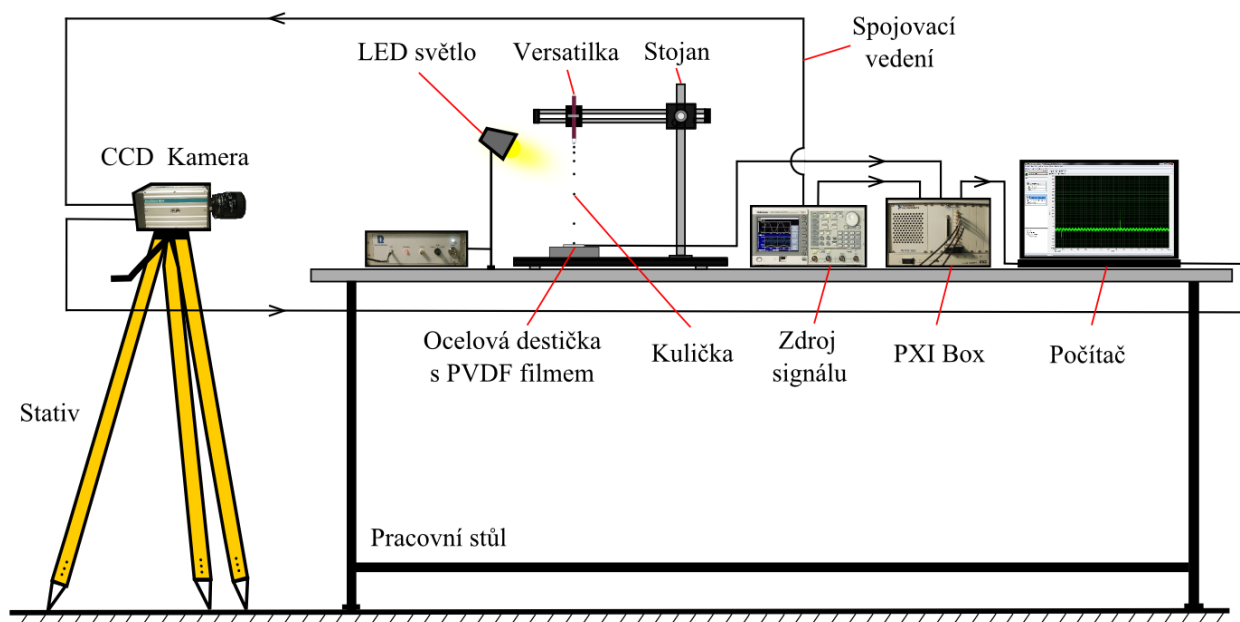
Princip metody pádu kuličky je vysvětlen s užitím obrázku 4.6.



Obr. 4.6: Metoda pádu kuličky

Ložisková kulička je držena versatilkou - automatickou tužkou s výsuvem KOH-I-NOOR 5640 pro nominální průměr tuhy 5,6 mm v určité poloze (pozice 1, výška h_1) nad destičkou s PVDF filmem, kde má vůči rovině filmu odpovídající potenciální energii. Kulička je uvolněna a padá v důsledku zemské tíže ve směru filmu, dochází k transformaci potenciální energie na kinetickou energii. Dopadá na film, který při deformaci absorbuje část celkové energie. Po odrazu letí od filmu směrem počáteční polohy, kinetická energie se mění v potenciální energii. Celková energie je už ale menší a tak kulička dosáhne menší vzdálenosti od roviny filmu než na počátku (pozice 2, výška h_2). Ze vztahů identických vztahů 4.1 – 4.4 pro kyvadlovou metodu lze určit velikost průměrné síly F_k na film. Sestava kalibračního měření je na obrázku 4.7. Základem je stojan, na jehož základně je ocelová destička s PVDF filmem (detail na obr. 3.13) a na jehož rameně je upevněna versatilka. Místo pádu kuličky je osvětlování LED světlem. CCD kamera je zaměřena do roviny pádu kuličky. Kalibrační měření je zahájeno ručně na zdroji signálu. Spustí se synchronizační signál, který je rovněž i startovním signálem pro snímkování CCD kamerou a startovací signál pro spuštění zaznamenávání signálu na PXI boxu. Se zpožděním je uvolněna kulička z versatilky. Probíhá

již popsany děj pohybu kuličky. Data z CCD kamery jsou vedena do počítače. Signál z PVDF filmu je veden přímo na oscilografickou kartu PXI boxu a z něj do počítače.

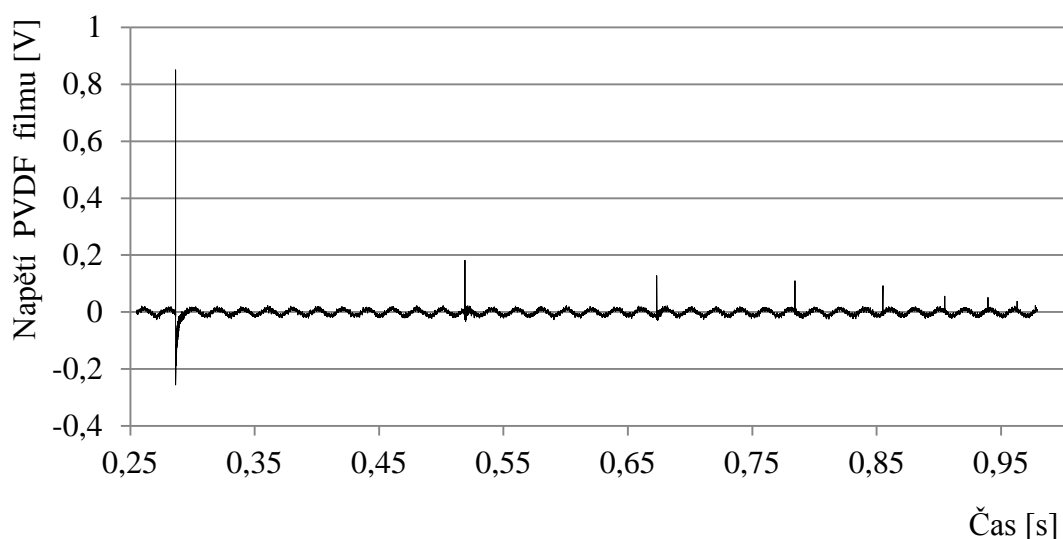


Obr. 4.7: Sestava kalibračního měření

CCD kamera a PXI box jsou ovládány a nastavovány z počítače. Ovládací program pro kameru je Motion Pro X Studio, ve kterém byly nastaveny tyto parametry snímání: činná plocha CCD čipu 1280 x 1024 pixelů, rychlost snímání 500 snímků za sekundu, expozice 1900 μ s, počet snímků 400. Ovládací program pro PXI box je LabVIEW Signal Express 2012. Bylo nastaveno: zaktivnění vstupu 0 (pro startovací signál od zdroje signálu; rozsah 6 V; vstupní impedance 1 M Ω ; start na náběžnou hranu pulzu v oboru kladného napětí a při překročení hodnoty napětí 2 V), zaktivnění vstupu 1 (pro záznam signálu od PVDF filmu; rozsah 6 V; vstupní impedance 1 M Ω ; vzorkovací frekvence 2 MS/s, tj. $2 \cdot 10^6$ vzorků za sekundu; délka záznamu 6000000 vzorků, tj. 3 sekundy). Ostatní parametry byly ponechány dle základního nastavení, např. offset 0V. Na zdroji signálu byly pomocí ovládacího panelu nastaveny parametry: synchronizační a zároveň startovací signál pro CCD kameru (401 pulzů; 3,5 V; 500 Hz) a startovní signál pro PXI box (1 pulz; 3,5 V; 100 ms).

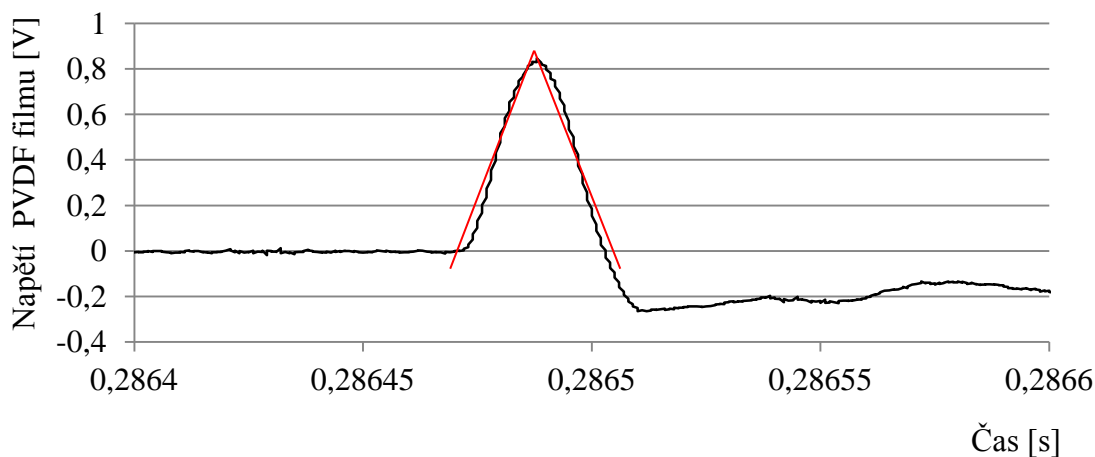
Výsledkem kalibrace jsou snímky pohybu kuličky a napěťový signál filmu z PVDF filmu. Zpracování snímků bylo provedeno v programu XnView 1.99.1, který slouží k prohlížení a zpracování obrázků. Nejdříve byl zpracován snímek pro určení měřítka mezi rozměrem na obrázku a rozměrem skutečným. Na snímku pravítka vloženého do roviny zaměření byl odečten skutečný rozměr na stupnici pravítka, který byl porovnán s rozměrem

v pixelech. Význam získaného měřítka je velikost skutečného rozměru na jeden pixel, např. 1 px ~ 0,1055... mm. Dále byly zpracovány snímky z kalibrace. Vždy došlo k odečtu vzdáleností h_1 a h_2 v pixelech a přepočtu na rozměr v metrech. Získané hodnoty byly zapsány do tabulky v Excelu. Následovalo zpracování napěťového signálu v programu LabVIEW Signal Express 2012. Ukázka vybraného signálu (pro lepší náhled upraven časový posuv) je v grafu 4.1. Jednotlivé vrcholy představují dopady kuličky na film. Na grafu je také vidět rušení ve tvaru sinusové nosné vlny. Příčina rušení není známá, může to být rušení elektrické sítě nebo úplně jiný zdroj. Při zpracování je rušení zohledněno.



Graf 4.1: Napěťový signál z kalibrace

Signál bylo nutné nejdříve předzpracovat. Prvním krokem bylo nalezení úrovně 0 na y-ové ose a její případné posunutí do správné pozice offsetem. Z kompletního signálu byla pro zmenšení množství zpracovávaných dat vybrána oblast prvního dopadu, tj. okolí prvního vrcholu, jak je tomu na grafu 4.2.



Graf 4.2: Oblast prvního dopadu s proloženými přímkami

Zpracování proběhlo metodou „Full width at half maximum“ (FWHM), která je vysvětlena na grafu 3.2. Na vzestupné části signálu byl nalezen bod, který má hodnotu poloviny maximálního napětí ve vrcholu. Tímto bodem a vrcholem byla proložena myšlená červená přímka. Průnik přímky s hodnotou $y = 0$ dává konvenční počáteční bod. Stejným způsobem byl určen konvenční konečný bod signálu. Signál s novými hranicemi byl programem statisticky zpracován. Byly zjištěny parametry signálu: střední hodnota napětí signálu [V], maximální dosažené napětí signálu [V], doba trvání signálu [s]. Tyto údaje byly doplněny do tabulky v Excelu k odpovídajícím vzdálenostem h_1 [m] a h_2 [m]. Dostává se tak kompletní sada hodnot veličin kalibrace. Hodnoty byly zaneseny do tabulky a zakresleny do dvou grafů závislosti průměrné hodnoty elektrického napětí [V] na průměrné síle [N] a závislosti maximální hodnoty elektrického napětí [V] na průměrné síle [N]. Následovala regresní analýza. Byla zvolena lineární regrese metodou nejmenších čtverců. Přímka se prokládá mezi naměřenými hodnotami v grafu tak, aby čtverce odchylek od naměřených hodnot byly co nejmenší. Jejím výsledkem je lineární závislost uvedených veličin ve tvaru přímky - lineární funkce $y = k \cdot x + q$. Pro tuto přímku byla nalezena hodnota spolehlivosti (koeficient determinace) R^2 , která po násobení číslem 100 udává procento, jakým je rozptyl hodnot závislé veličiny „vysvětlen“ změnami hodnot nezávislé veličiny pro daný případ regrese. Hodnota se nachází v intervalu od 0 do 1. Větší hodnoty znamenají větší úspěšnost regrese a i kvalitněji zvolený model.

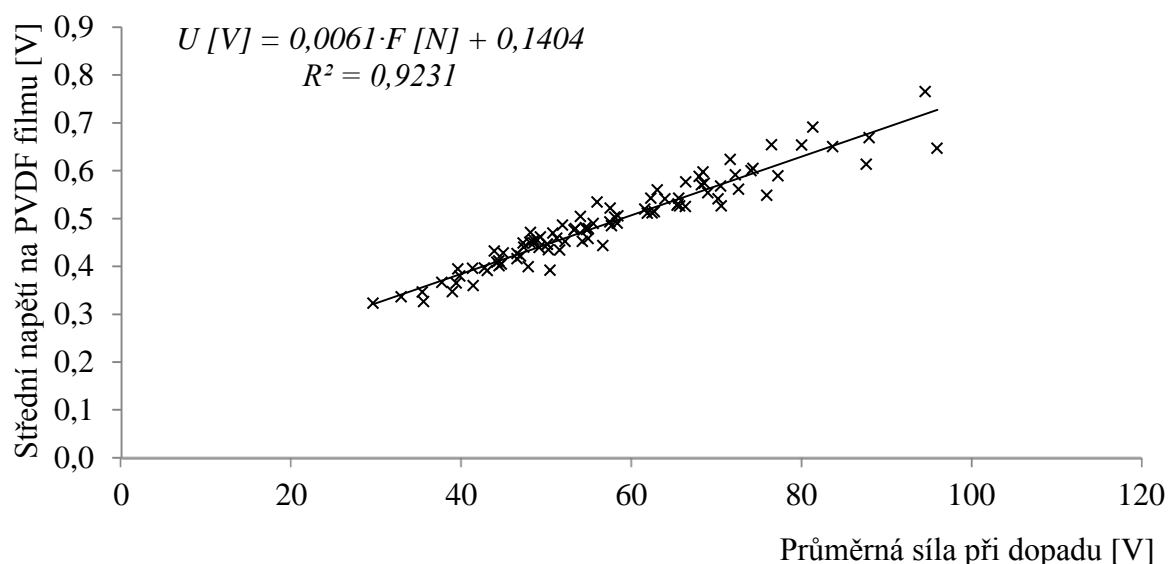
Kalibrace byla provedena pro dvě ložiskové kuličky o průměru 5 mm (0,51 g) a o průměru 6 mm (0,88 g). Každé kalibrační měření bylo v jeho průběhu a hned poté vizuálně hodnoceno. Špatná měření (špatný odskok, ...) byla hned vyřazena. Počet platných měření pro kuličku průměru 5 mm je 49 a pro kuličku průměru 6 mm je 45. Zpracování bylo provedeno popsáním způsobem; zde je uveden vzorový výpočet pro páté platné měření kuličky průměru 6 mm. Vzorový výpočet je uveden se zaokrouhlenými hodnotami na tři platné číslice.

$$\text{rychlost před dopadem } v_1 = \sqrt{2 \cdot g \cdot h_1} = \sqrt{2 \cdot 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot 0,198 \text{ m}} = 1,97 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

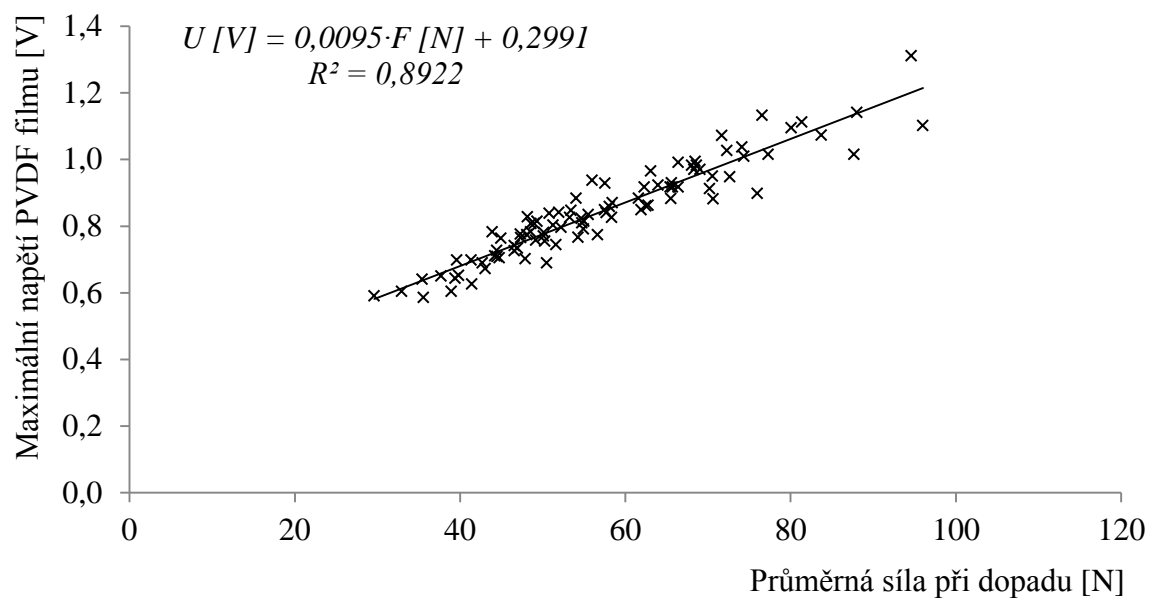
$$\text{rychlost po odrazu } v_2 = \sqrt{2 \cdot g \cdot h_2} = \sqrt{2 \cdot 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot 0,059 \text{ m}} = 1,08 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\text{prům. síla } F_k = \frac{m}{\tau} (v_1 + v_2) = \frac{0,00088 \text{ kg}}{0,000033 \text{ s}} (1,97 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} + 1,08 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}) = 81 \text{ N}$$

Hodnoty kalibrace jsou v tabulce v příloze 3. Upozorňuji, že tabulkové hodnoty v Excelu jsou nezaokrouhlené. Výpočet byl proveden pro nezaokrouhlené hodnoty odečtené při zpracování a přenesené přímo funkcí kopírování na počítači. Hodnoty výsledné síly jsou zaokrouhlené na dvě platné číslice. Výsledné hodnoty byly vyneseny do grafů. Data byla proložena regresní přímkou, byl nalezen její analytický tvar a koeficient determinace. Graf 4.3 udává závislost středního napětí na PVDF filmu na průměrné síle při dopadu s regresní přímkou $U [V] = 0,0061 \cdot F [N] + 0,1404$ a koeficientem determinace $R^2 = 0,9231$. Graf 4.4 udává závislost maximálního napětí na PVDF filmu na průměrné síle při dopadu s regresní přímkou $U [V] = 0,0095 \cdot F [N] + 0,2991$ a koeficientem determinace $R^2 = 0,8922$. Regresní přímka je pro měření v rámci experimentu kalibrační přímkou PVDF filmu a slouží pro reverzní výpočet síly působící na PVDF film při experimentu.



Graf 4.3: Graf závislosti středního napětí na PVDF filmu na průměrné síle



Graf 4.4: Graf závislosti maximálního napětí na PVDF filmu na průměrné síle

5 EXPERIMENT

Kapitola o experimentu je hlavní částí diplomové práce. Cílem je zhodnocení chování kavitační bublinky v blízkosti rovinné stěny. Součástí kapitoly je popis experimentu, nalezení vzorů chování kavitační bublinky v blízkosti pevné stěny a zhodnocení naměřených výsledků.

5.1 Vstupní parametry experimentu

V rešeršní části diplomové práce byla dokumentována odlišnost chování kavitační bublinky v blízkosti těles od chování ve volné kapalině. Uvažovaným tělesem v případě experimentu je ocelová destička s rovinným povrchem. Interakce bublinky s destičkou závisí na vzdálenosti bublinky od stěny a také na její velikosti. To jsou parametry experimentu, přesná definice je maximální poloměr kavitační bublinky R_{max} [mm] a počáteční vzdálenost středu kavitační bublinky od stěny L [mm]. Z hlediska maximálního poloměru kavitační bublinky byly uvažovány tři velikosti kavitačních bublinek. Jejich velikost závisí na elektrickém napětí přivedeném na dotyk elektrod. Ve skutečnosti je velikost bublin v důsledku různých ovlivňujících faktorů různá i při stále totožném elektrickém napětí. Použitá napětí a jim odpovídající zaokrouhlené rozpětí poloměrů a medián při experimentu byly: 30 V (2,045 - 2,524 mm; 2,2mm), 40 V (3,763 - 4,452 mm; 4,1 mm), 50 V (5,141 - 6,268 mm; 6mm). Uvažované vzdálenosti středu kavitační bublinky plynuly z nalezených obecných vzorů chování kavitační bublinky v blízkosti pevné stěny. Měřilo se v několika různých vzdálenostech od stěny. Rozsah byl od několikanásobku poloměru dané bublinky po čtvrtinu poloměru dané bublinky. Definuje se parametr γ , dávající do vazby vzdálenost středu kavitační bublinky od stěny a maximální poloměr bublinky.

$$\gamma = \frac{L}{R_{max}} \left[\frac{mm}{mm} \right] \quad 5.1$$

Wang a Chen [21] provedli experiment s kavitačními bublinkami s fixním poloměrem $R_{max} = 10,4 \text{ mm}$ pro různé vzdálenosti L , čemuž odpovídá interval parametru γ od 8 do 0,14. Parametr γ stanovili jako základní hodnotící parametr pro hodnocení interakce kavitační bublinky a pevné stěny. Výsledkem jejich práce je stanovení čtyř intervalů veličiny γ , ve kterých popsali chování kavitační bublinky. Jedná se o intervaly $\gamma \geq 3$; $1,1 < \gamma < 2$; $0,6 < \gamma < 1,1$; $\gamma < 0,6$.

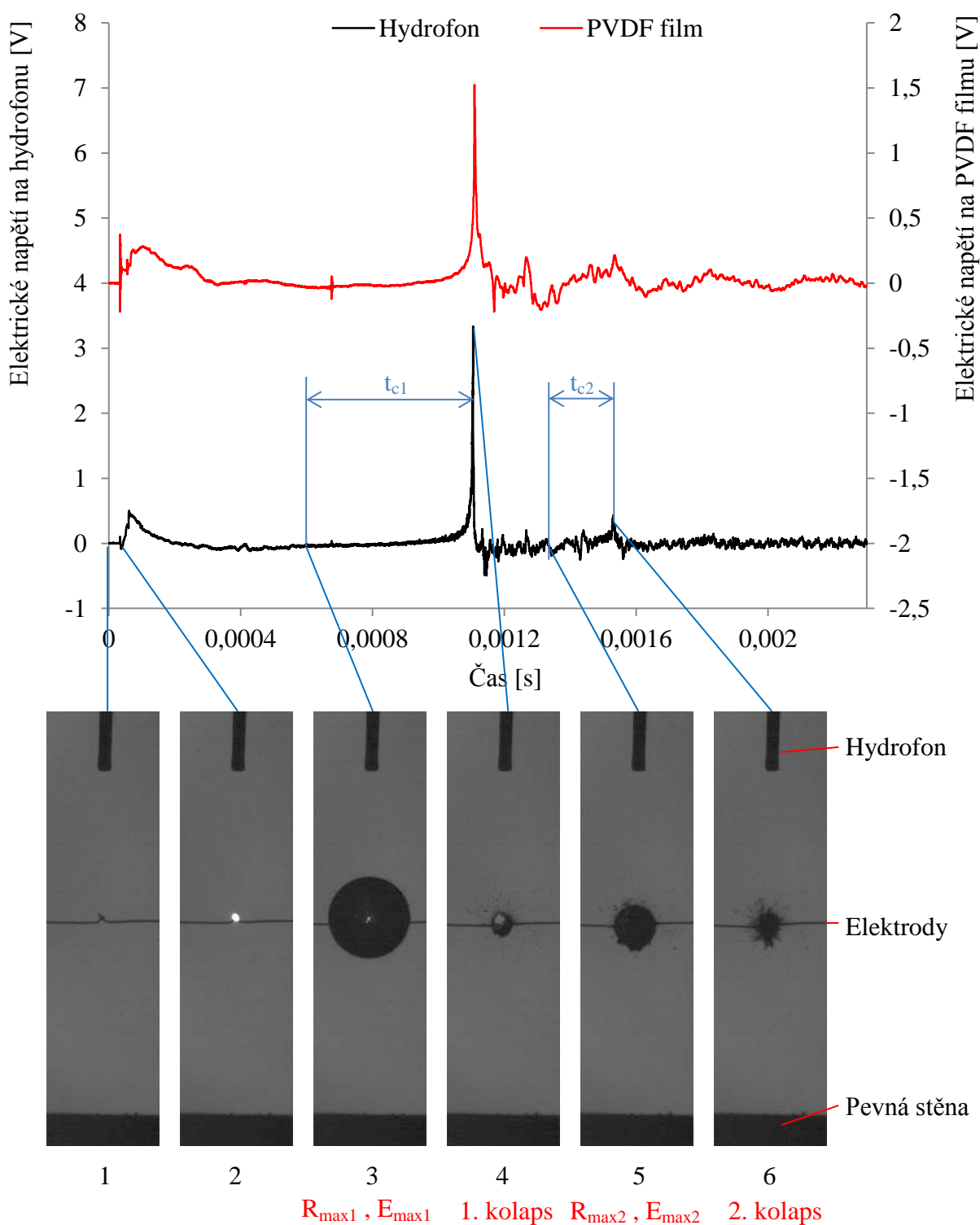
5.2 Popis a nastavení experimentu

Při experimentu byla použita experimentální sestava a zařízení popsané v kapitole 3. CCD kamera a PXI box byly nastaveny z počítače. Nastavení kamery v programu Motion Pro X Studio mělo tyto parametry: činná plocha CCD čipu 104 x 400 pixelů, rychlost snímání 10 000 snímků za sekundu, expozice 8 μ s, počet snímků 199. Nastavení PXI boxu v LabVIEW Signal Express 2012 mělo parametry: zaktivnění vstupu 0 (pro startovací signál od zdroje signálu; rozsah 6 V; vstupní impedance 1 M Ω ; start na náběžnou hranu pulzu v oboru kladného napětí a při překročení hodnoty napětí 2 V), zaktivnění vstupu 1 (pro záznam signálu od PVDF filmu; rozsah 30 V; vstupní impedance 1 M Ω ; vzorkovací frekvence 60 MS/s, tj. $6 \cdot 10^7$ vzorků za sekundu; délka záznamu 2 000 000 vzorků, tj. 0,03 sekundy), zaktivnění vstupu 2 (pro záznam signálu od PVDF hydrofonu; rozsah 30 V; vstupní impedance 1 M Ω ; vzorkovací frekvence 60 MS/s, tj. $6 \cdot 10^7$ vzorků za sekundu; délka záznamu 2 000 000 vzorků, tj. 0,03 sekundy). Ostatní parametry byly ponechány dle základního nastavení, např. offset 0V. Nastavení zdroje signálu pomocí ovládacího panelu mělo parametry: synchronizační a zároveň startovací signál pro CCD kameru (200 pulzů; 3,5 V; 10000 Hz), startovní signál pro PXI box (1 pulz; 3,5 V; 100 ms), spínací signál pro relé (1 pulz; 3,5 V; 100 ms). Hydrofon byl od místa dotyku elektrod vzdálen o 13,5 mm \pm 0,2 mm. Zesilovač PVDF hydrofonu byl nastaven na stejnosměrné elektrické napětí se zesílením 100.

5.3 Metodika zpracování naměřených dat

Měřením v různých pozicích nad destičkou při různých poloměrech kavitačních bublin se získají elektrické signály z PVDF filmu a PVDF hydrofonu a snímky z CCD kamery. Snímky z CCD kamery byly zpracovány v programu XnView 1.99.1. První zpracovávaný snímek sloužil pro nalezení měřítka transformace mezi snímkem a skutečností. Snímek pro určení měřítka byl získán vyfocením pravítka vloženého do roviny, ve které se generovala kavitační bublinka. Po získání měřítka (běžně např. 1 px \sim 0,1045... mm) je už možné ostatní rozměry odečtené v pixelech přepočítat na rozměry v m. Zjišťovaly se maximální poloměry bublin před prvním a druhým kolapsem a počáteční vzdálenost středu bublinky od destičky. Snímky s bublinami deformovaných tvarů bylo obtížné a někdy i nemožné zpracovat.

Elektrický signál z PVDF hydrofonu a PVDF filmu byl hodnocen a zpracován v programu LabVIEW Signal Express 2012. Průběhy elektrických signálů z měřidel s parametry $\gamma = 4,73$ a $R_{\max} = 4,081$ mm (40 V) jsou na následujícím obrázku.



Obr. 5.1: Elektrické signály měřidel a odpovídající snímky kavitačních bublinek

Je třeba si uvědomit rozdíly při působení bublinky na senzory. Pokud vznikne rázová vlna, jet efekt a splash efekt, hydrofon zaznamená působení pouze od rázové vlny šířící se do celého prostoru. Hydrofon totiž bublinku oproti pevné stěně, která je o hodně větší než špička

hydrofonu, téměř neovlivňuje. Jet efekt a splash efekt vznikají právě u pevné stěny. Proto PVDF film na pevné stěně, se kterou bublinka interaguje, zaznamenává společně působení od rázové vlny, jet efektu a splash efektu. Snímek číslo 1 ukazuje elektrody před startem experimentu; po spojení obvodu elektrod na snímku 2 obvodem prochází proud, dotyk se zahřívá a generuje se bublinka. Snímek číslo 3 ukazuje bublinku, která právě dosáhla prvního maximálního poloměru. Bublinka kolabuje na snímku 4. Následně roste na druhý maximální poloměr na snímku 5 a pak podruhé kolabuje na snímku 6.

Z uvedených signálů nás zajímal celkový průběh signálu a u signálu z PVDF filmu navíc maximální elektrické napětí, odpovídající namáhání PVDF filmu při daném nastavení. Transformace elektrických signálů na tlak naměřený hydrofonem a sílu naměřenou na PVDF filmu byla provedena pomocí citlivosti hydrofonu a kalibrační přímky PVDF filmu. Následuje vzorový výpočet pro maxima signálů z předchozího obrázku.

Hydrofon

citlivost $k_h = 29 \frac{mV}{MPa}$, zesilovač $G = 40 \text{ dB} \approx Z = 100$ násobné

maximální napětí na hydrofonu po 1. kolapsu: $U_h = 3,33498 \text{ V}$

maximální tlak naměřený hydrofonem: $p = \frac{U_h}{Z \cdot k_h} = \frac{3,33498}{100 \cdot 0,029} \doteq 1,2 \text{ MPa}$

PVDF film

kalibrační přímka $U_f[V] = 0,0095 \cdot F_f[N] + 0,2991$

inverzí vznikne vztah $F_f[N] = \frac{U_f[V] - 0,2991}{0,0095}$

maximální napětí na PVDF filmu po 1. kolapsu: $U_f = 1,82415 \text{ V}$

maximální síla na PVDF filmu po 1. kolapsu: $F_f = \frac{1,82415 - 0,2991}{0,0095} \doteq 160 \text{ N}$

Vzorový výpočet se týká maximálních hodnot tlaku a síly. Obdobným způsobem se provádí transformace celých průběhů elektrických signálů z hydrofonu a PVDF filmu. Získá se průběh tlaku na špičce hydrofonu a průběh síly působící na PVDF film. Výsledné průběhy tohoto vzorového případu po transformaci jsou v grafu 5.1 (pozn. graf je v následující kapitole).

Na signálech se navíc určovala doba kolapsu t_c , tj. doba mezi maximálním dosaženým poloměrem bublinky a kolapsem. Doba kolapsu je dána vztahem 5.1 [4]

$$t_c = 0,915 \cdot \sqrt{\frac{\rho \cdot R_0^2}{p_\infty - p_s}} [s] \quad 5.1$$

za uvažování zjednodušujících předpokladů, které jsou: vnitřek bublinky je prázdný; neuvažuje se povrchové napětí. Ve vztahu je ρ [kg/m³] hustota okolní kapaliny, R_0 [m] je referenční poloměr bublinky, p_∞ [Pa] tlak v nekonečné vzdálenosti od bublinky a p_s [Pa] je tlak nasycených par okolní kapaliny. Při výpočtu uvažujeme hodnoty $\rho = 998 \text{ kg/m}^3$, $p_\infty = 100\,000 \text{ Pa}$ a $p_s = 2505 \text{ Pa}$ [26]. Pokud není možné určit ze snímků CCD kamery referenční – maximální poloměr R_{\max} , je možné tento poloměr určit ze zjištěné doby kolapsu úpravou vztahu 5.1. Ze známé hustoty, tlaků a doby kolapsu lze vyjádřit referenční - maximální poloměr. Doba kolapsu se přitom určuje jako polovina času mezi amplitudami start růstu bublinky – 1. kolaps a mezi amplitudami 1. kolaps - 2. kolaps. Znalost hodnot maximálních poloměrů je důležitá pro výpočet energie bublinky.

Při vyhodnocení se pracovalo s čistou energií bublinky, která se skládá z energie mezifázového rozhraní a energie na růst bublinky („přetlačení“ kapaliny). Tato energie je dána vztahem 5.2 [4]

$$E = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot R_0^3 \cdot (p_\infty - p_v) [J] \quad 5.2$$

Ze vztahu 5.2 je možné dopočítat energii bublinky o daném referenčním – maximálním poloměru. Z rozdílů energií při maximálním poloměru bublinky před prvním a před druhým kolapsem je možné zjistit část energie uvolněné při kolapsu a „aktivitě“ mezi těmito časy. Je zřejmé, že tato energie je součtem energií pro mnoho různých dějů a efektů, a nejenom na energii uvolněnou při kolapsu, která ale jistě tvoří velkou část.

Poslední vyhodnocovanou veličinou je maximální mechanické napětí působící na PVDF film během aktivity bublin. Mechanické napětí působící na PVDF film ve směru kolmém na činnou plochu filmu – směr 3, lze dopočítat přímo a je dané vztahem 5.3 [25]

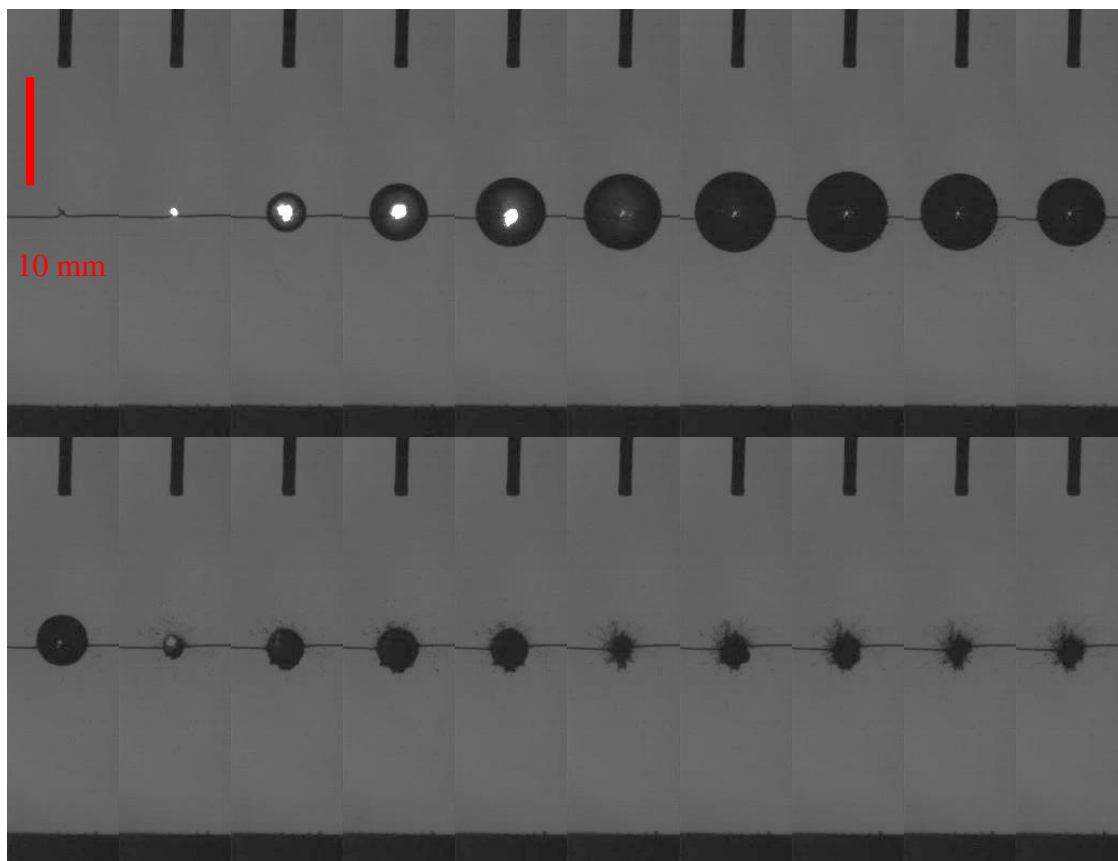
$$X_3 = \frac{U}{g_{33} \cdot t_f} [Pa] \quad 5.3$$

Veličina U [V] je elektrické napětí naměřené na PVDF filmu v důsledku namáhání ve směru kolmém na činnou plochu filmu; g_{33} [V·m·N⁻¹] je piezoelektrická nábojová konstanta pro působení namáhání ve směru 3 a sběr napětí na plochách kolmých na směr 3, a t_f [m] je tloušťka PVDF filmu. Vlastnosti použitého PVDF filmu jsou: $g_{33} = 330 \cdot 10^{-3} \text{ V} \cdot \text{m} \cdot \text{N}^{-1}$, $t_f = 28 \text{ } \mu\text{m}$.

5.4 Vzory chování kavitační bublinky v blízkosti pevné stěny

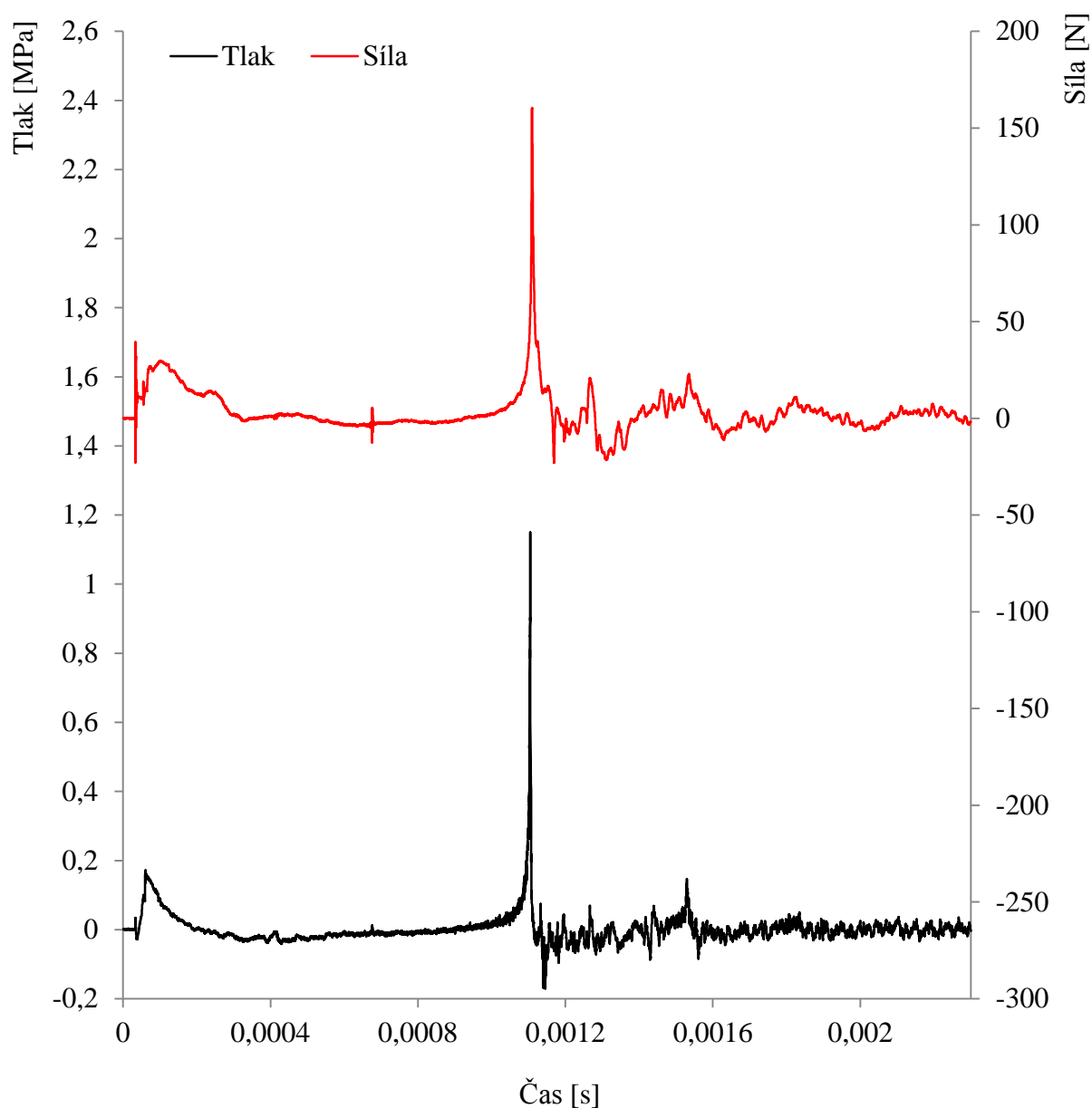
Před vlastním experimentem byly nalezeny vzory chování kavitační bublinky v blízkosti pevné stěny. Princip spočíval v trasování vzdálenosti středu kavitační bublinky pro jeden poloměr bublinky. Trasování bylo zajištěno polohovatelným stojanem. Postupovalo se z téměř volné tekutiny s kulovou bublinkou až k bublince „nalepené“ přímo na stěně. Byla použita měřicí sestava shodná s experimentální sestavou. Výsledkem jsou série snímků, na kterých budou vysvětleny vzory chování. Na každém snímku jsou rozpoznatelné: ve spodní části pevná stěna - ocelová destička s PVDF filmem, ve střední části elektrody a v horní části hydrofon. Každá série má na prvním snímku porovnávací měřítko. Vzory chování byly studovány například v práci [27].

Mohou nastat tři případy vzorů chování v blízkosti pevné stěny. Na sérii snímků na následujícím obrázku je vidět první ze vzorů chování kavitační bublinky generované 40 V s parametry uvedenými pod obrázkem. Tento případ je typický pro bublinku ve velké vzdálenosti od pevné stěny. Kulový tvar bublinky není při prvním růstu téměř ovlivněn a nevzniká jet efekt ani splash efekt. Bublinka při své aktivitě zůstává na stejném místě.



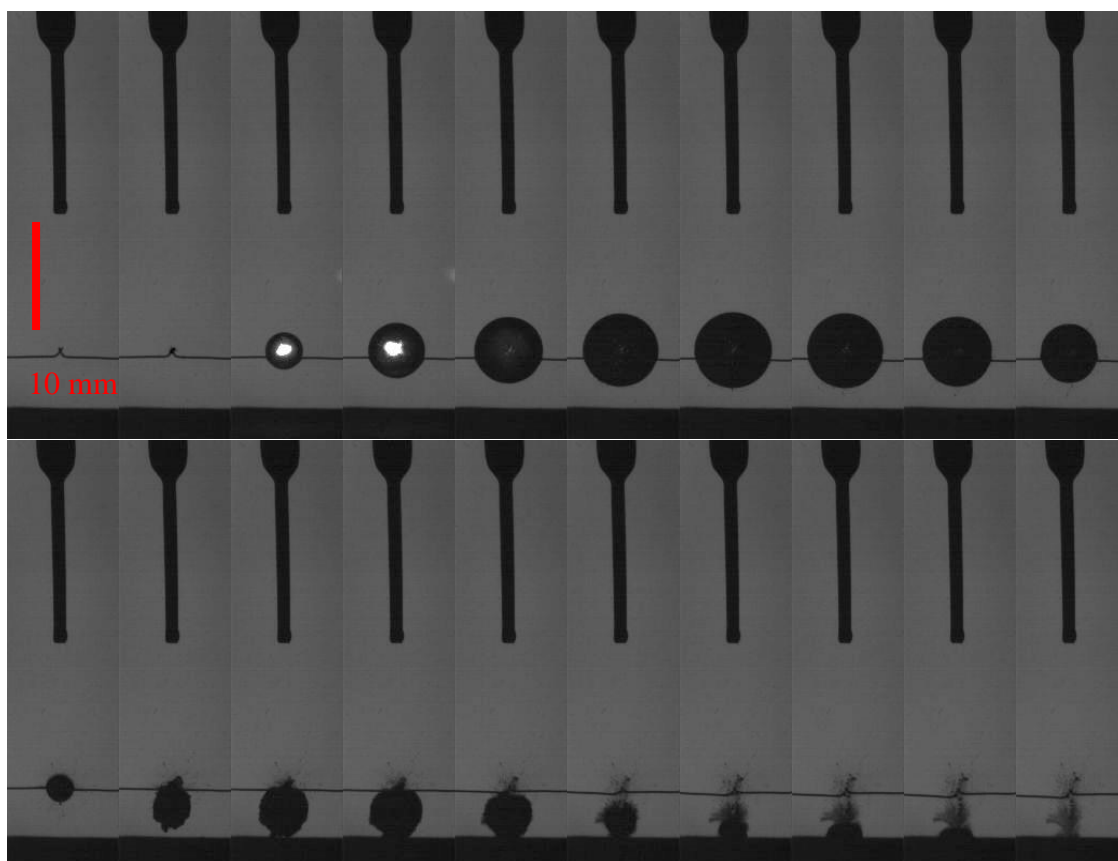
Obr. 5.2: První vzor (časový interval mezi snímky je 100 μ s; $\gamma = 4,73$; $R_{\max} = 4,081$ mm)

Graf 5.1 znázorňuje průběh tlaku na špičce hydrofonu a průběh síly na PVDF filmu pro první vzor chování. Z grafu je zřejmé, že tlak a síla generované prvním kolapsem jsou výrazně větší než při druhém kolapsu. Posouzením snímků a grafu vidíme, že nedochází k žádnému přímému působení bublinky na stěnu. Interakce mezi bublinkou a stěnou se totiž koná rázovou vlnou generovanou ke konci kolapsu, jejíž energie, než dospěje ke stěně, je z části disipována. Síla působící na film je tak oproti dalším vzorům menší.



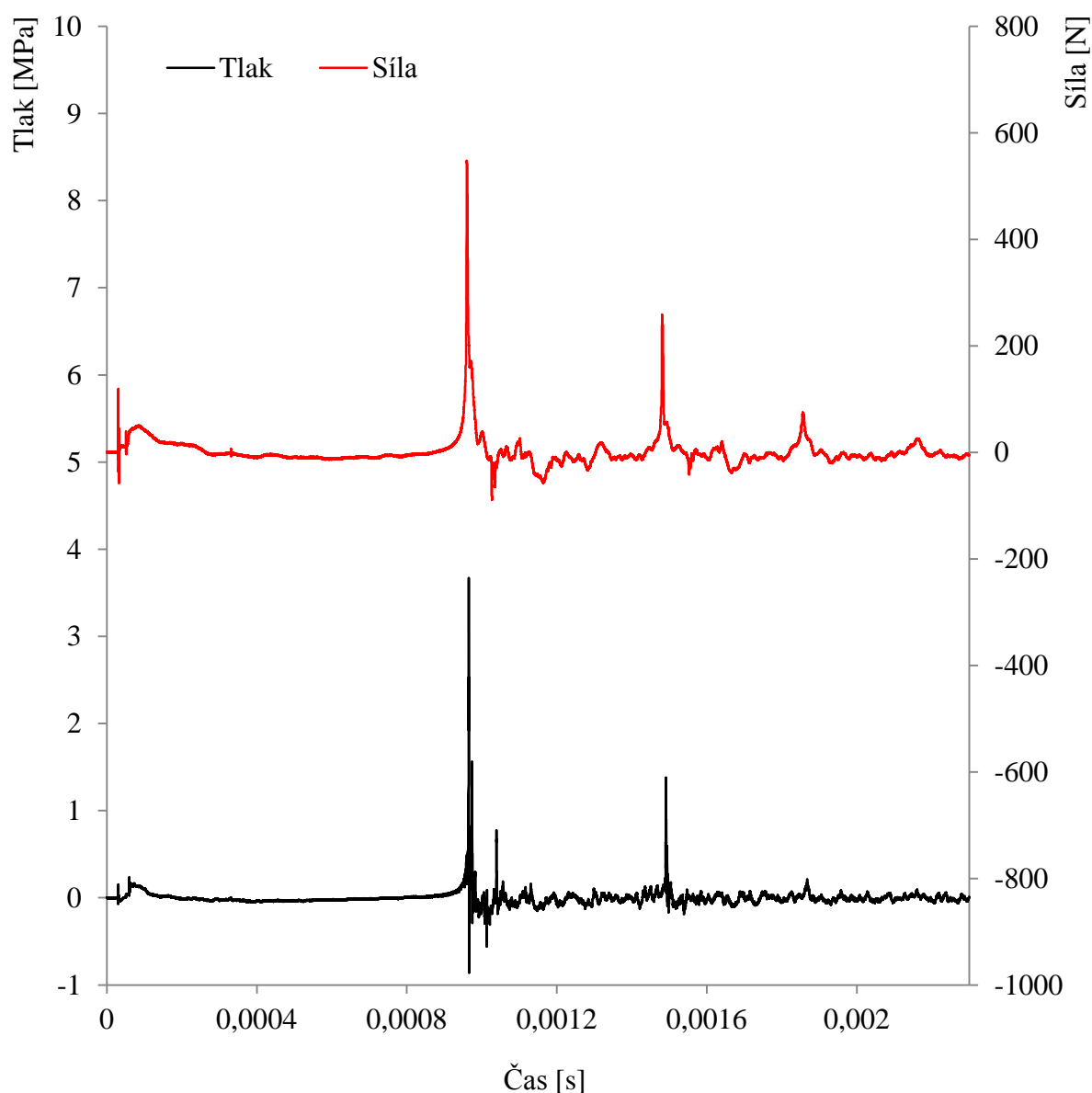
Graf 5.1: Průběh tlaku na hydrofonu a síly na PVDF filmu pro první vzor

Druhým vzorem je případ bublinky ve střední vzdálenosti od stěny. Na následujícím obrázku jsou snímky chování kavitační bublinky generované 40 V s parametry uvedenými pod obrázkem. V tomto případě je už tvar bublinky ovlivněn přítomností stěny. Po prvním kolapsu vzniká jet efekt. Bublinka je v důsledku předchozího růstu, který vyvolal proud tekutiny a pokles tlaku u stěny, přitahována ke stěně. Druhý kolaps nastává blíže u stěny. Další kolapsy probíhají již na stěně.



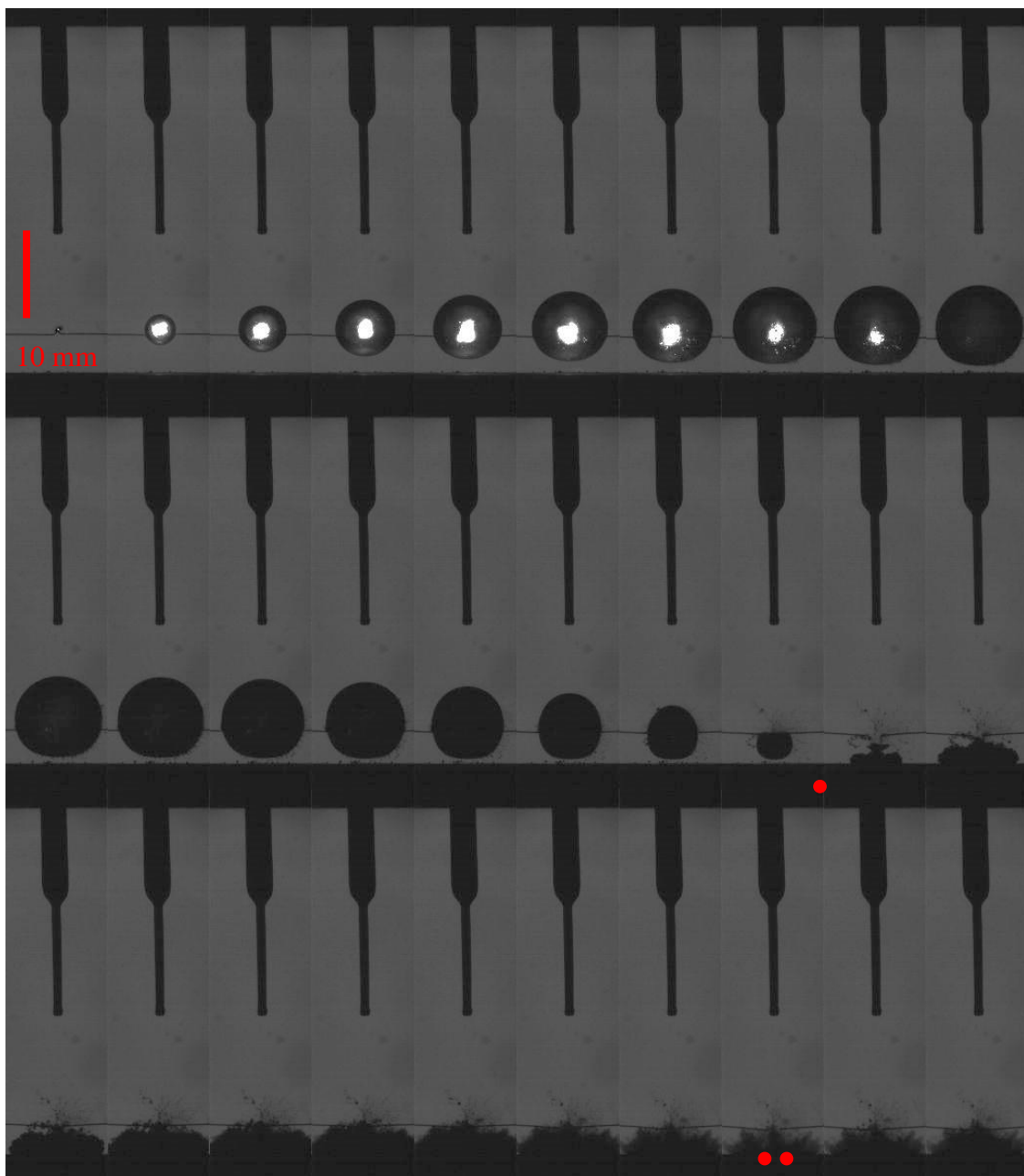
Obr. 5.3: Druhý vzor (časový interval mezi snímky je $100\ \mu\text{s}$; $\gamma = 1,50$; $R_{\text{max}} = 3,816\ \text{mm}$)

Na grafu 5.2 je znázorněn průběh tlaku na špičce hydrofonu a průběh síly na PVDF filmu pro druhý vzor chování. Na grafu lze vidět, že tlak a síla, generované prvním kolapsem, jsou větší než při druhém kolapsu a výrazně větší než při třetím kolapsu. Většina energie bublinky byla uvolněna během prvního a druhého kolapsu.



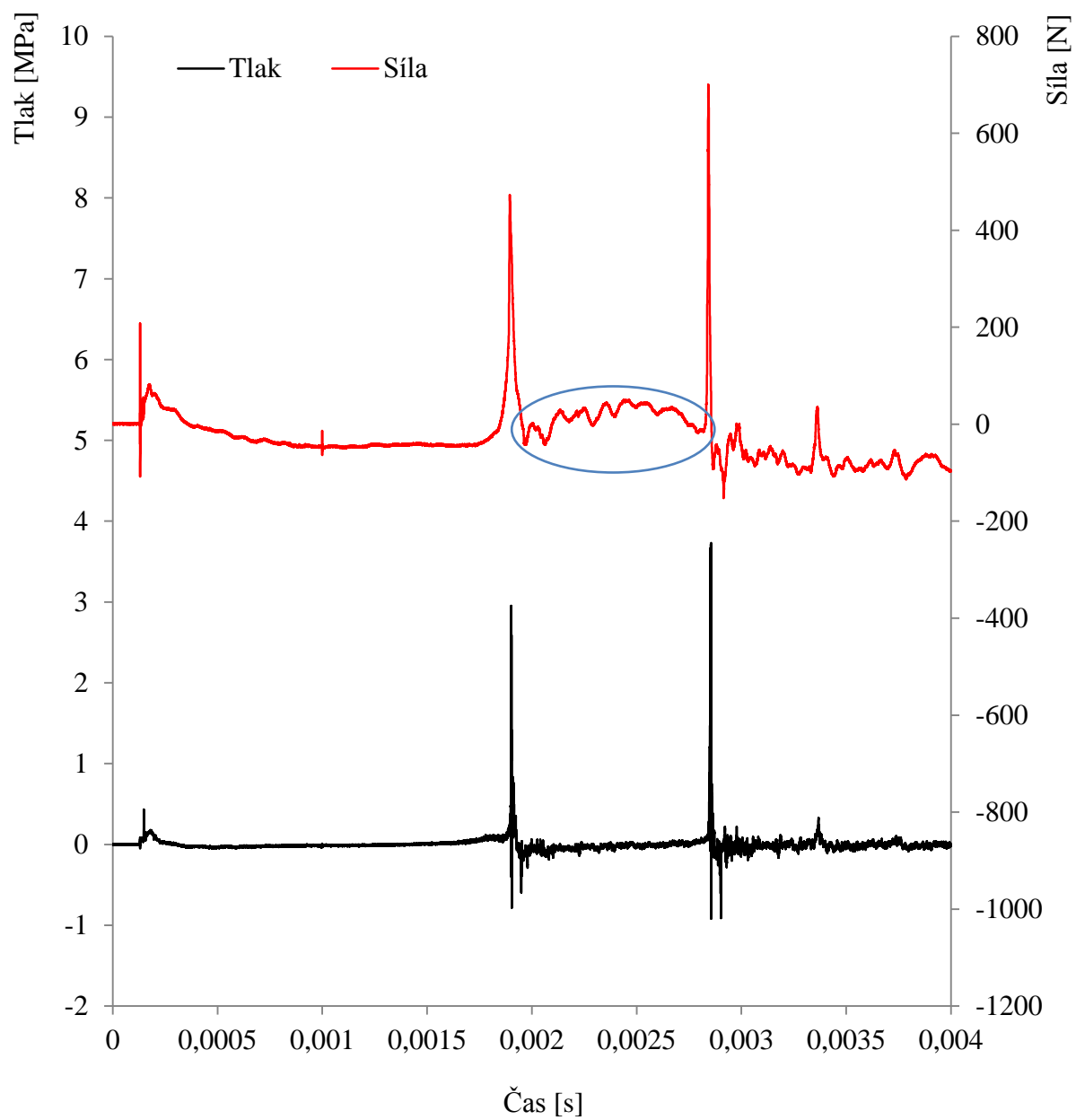
Graf 5.2: Průběh tlaku na hydrofonu a síly na PVDF filmu pro druhý vzor

Třetím vzorem je případ bublinky vyskytující se blízko u stěny. Tento případ je na následujícím obrázku s bublinkou generovanou napětím 50 V a s parametry uvedenými pod obrázkem. Bublinka je tak blízko, že je přitažena a následně přisáta ke stěně už v průběhu prvního kolapsu. Přitom se rozpadá na „mrak“ mnoha menších bublinek různých nepravidelných tvarů. Bublinkový „mrak“ prochází svou aktivitou včetně kolapsu již na stěně. Brennen ve svých pracích uvádí, že bublinkový „mrak“ má na své okolí téměř stejný vliv, jako by se jednalo o jednu kompaktní bublinku.



Obr. 5.4: Třetí vzor (časový interval mezi snímky je 100 μ s; $\gamma = 1,01$; $R_{\max} = 5,986$ mm)

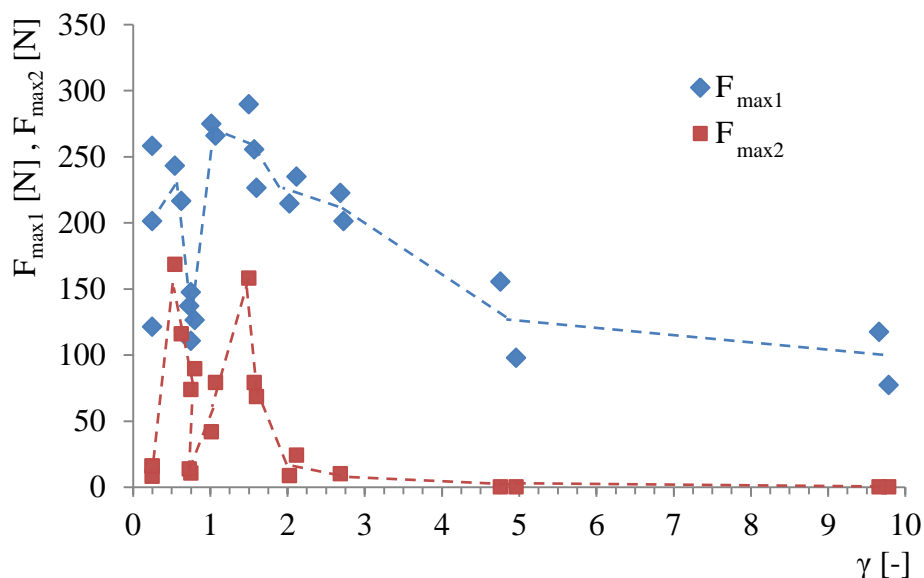
Na grafu 5.3 je průběh tlaku na špičce hydrofonu a průběh síly na PVDF filmu pro třetí vzor chování. Na grafu lze vidět, že tlak a síla generované prvním kolapsem jsou menší než při druhém kolapsu a výrazně větší než při třetím kolapsu. Většina energie bublinky byla uvolněna během prvního a druhého kolapsu. Dále je na průběhu síly v oblasti mezi prvním a druhým kolapsem vyznačena oválem oblast síly od splash efektu.



Graf 5.3: Průběh tlaku na hydrofonu a síly na PVDF filmu pro třetí vzor

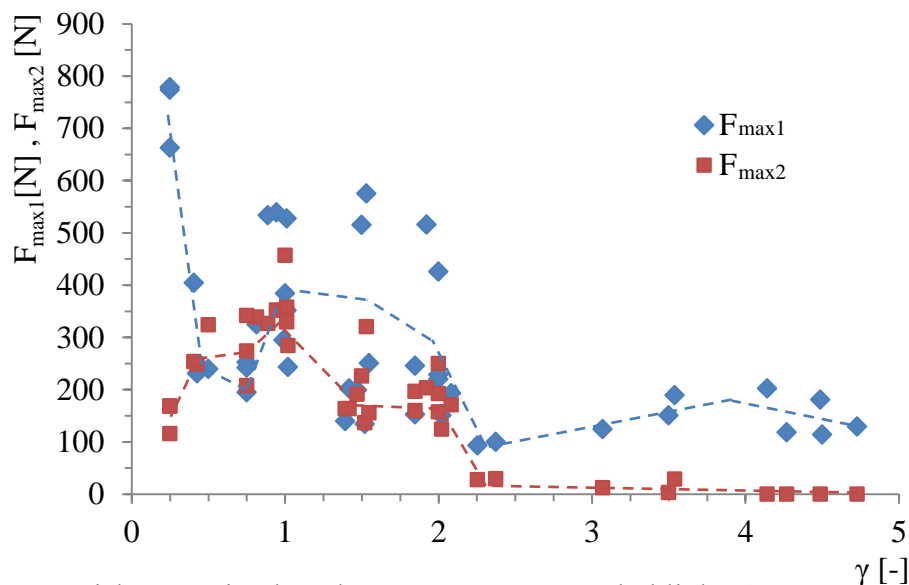
5.5 Síly interakce kavitační bublinky a pevné stěny

Transformací elektrických signálů z PVDF filmu je získána závislost maximální síly související s 1. a 2. kolapsem v závislosti na parametru γ pro tři velikosti poloměru. Tyto závislosti jsou na následujících grafech. Graf 5.4 je pro bublinku generovanou 30 V s mediánem poloměru 2,2 mm (dále jen „bublinka 2,2 mm“); graf 5.5 pro bublinku generovanou 40 V s mediánem poloměru 4,1 mm (dále jen „bublinka 4,1 mm“) a graf 5.6 pro bublinku generovanou 50 V s mediánem poloměru 6,0 mm (dále jen „bublinka 6,0 mm“). Každý graf obsahuje dvě závislosti, modře závislost síly $F_{\max1}$ související s prvním kolapsem a červeně závislost síly $F_{\max2}$ související s druhým kolapsem. Trend závislosti obou sil je vyznačen lomenou čarou.



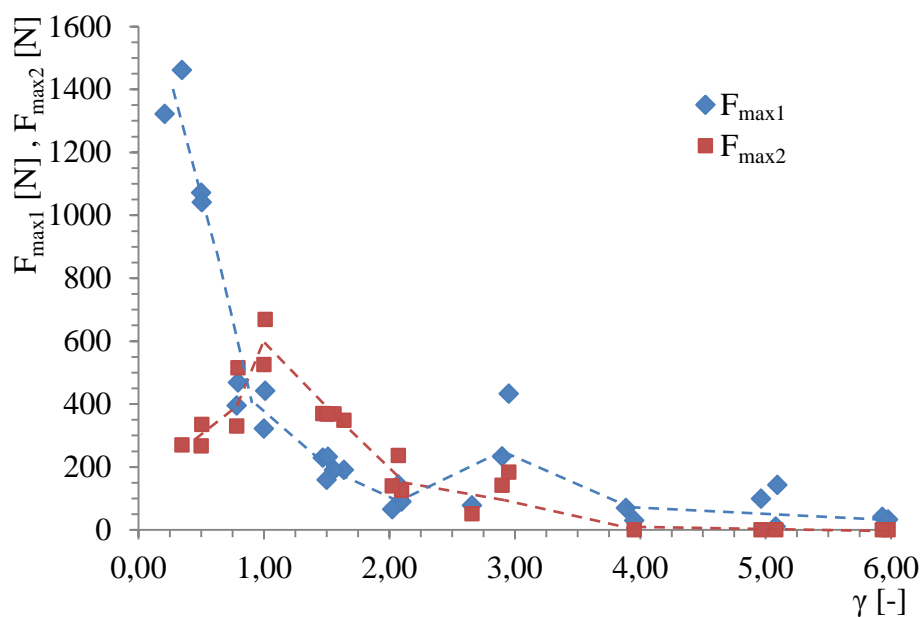
Graf 5.4: Závislost maximální síly na parametru γ pro bublinku 2,2 mm

Z grafu 5.4 je zřejmé, že čím blíže se bublinka vyskytuje u stěny (hodnota parametru γ klesá), roste síla interakce s pevnou stěnou. Při $\gamma = 0,8$ nastává pokles obou sil a při dalším přiblížení opět obě síly rostou. Při velké vzdálenosti od stěny bublinka interaguje se stěnou pouze při 1. kolapsu, velikost síly 2. kolapsu je zanedbatelná. Při výskytu bublinky blíže u stěny, přibližně hodnoty $\gamma = 2,5$ začíná růst síly od druhého kolapsu. Při dalším přiblížení nastává zmíněný pokles a opět nárůst obou sil. Důvod není znám. V této oblasti se hodnoty sil 1. a 2. kolapsu k sobě přibližují, ale hodnoty při 2. kolapsu nejsou větší než při 1. kolapsu. Při dalším přiblížení klesá síla od 2. kolapsu a významná zůstává pouze síla od 1. kolapsu.



Graf 5.5: Závislost maximální síly na parametru γ pro bublinku 4,1 mm

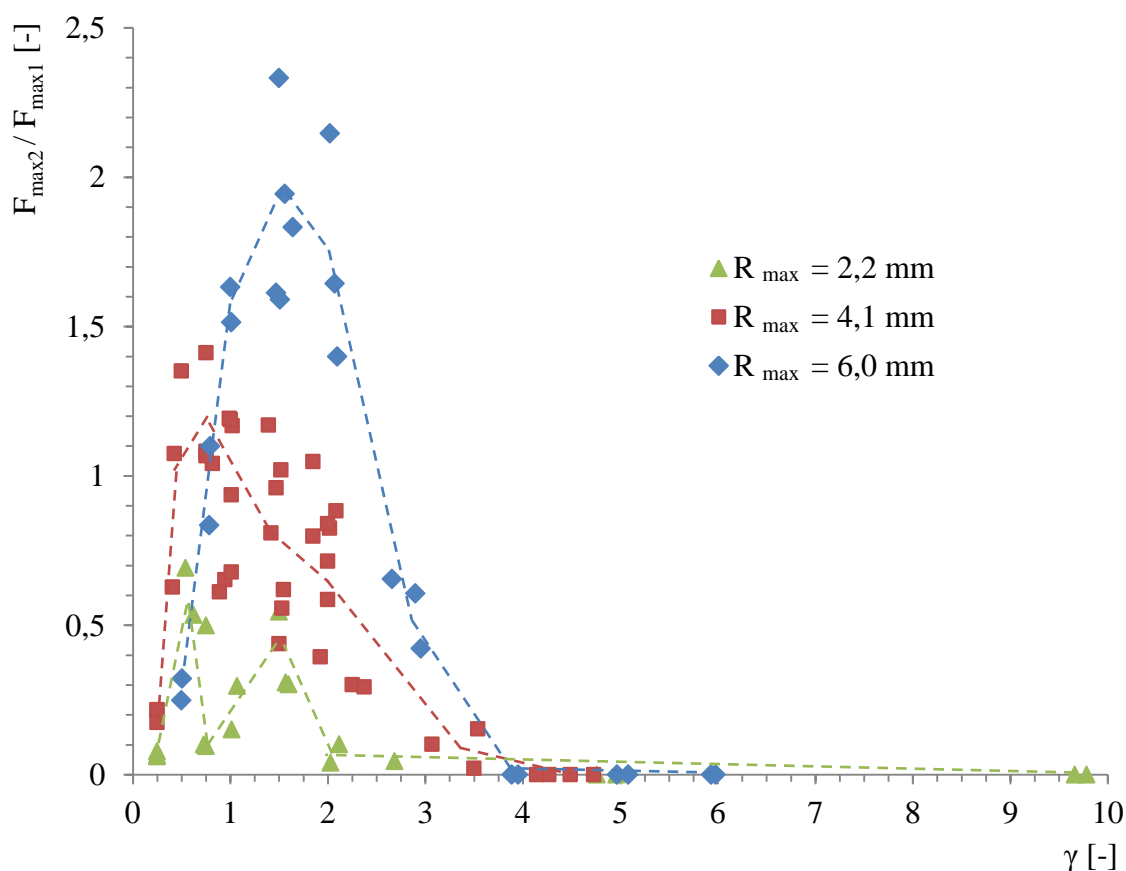
Na grafu 5.5 opět vidíme, že pokud se bublinka vyskytuje blíže u stěny, roste síla interakce s pevnou stěnou. Při velké vzdálenosti od stěny dochází k interakci se stěnou pouze při 1. kolapsu, velikost síly od 2. kolapsu je zanedbatelná. Při bližších vzdálenostech od stěny, kolem hodnoty $\gamma = 2,25$ narůstá síla od druhého kolapsu. Při dalším přiblížení se hodnoty sil 1. a 2. kolapsu k sobě přibližují, až se při $\gamma = 0,9$ vyrovnají a dokonce hodnota 2. kolapsu převyší hodnotu 1. kolapsu. Při dalším přiblížení klesá síla od 2. kolapsu a zároveň roste síla od 1. kolapsu.



Graf 5.6: Závislost maximální síly na parametru γ pro bublinku 6,0 mm

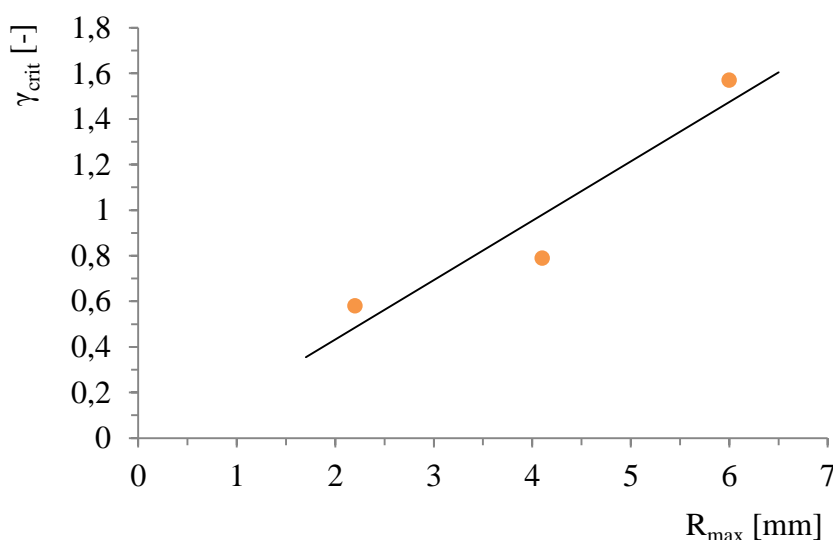
Na grafu 5.6, jako na předcházejících grafech, vidíme, že čím je bublinka blíže stěně, roste síla interakce s pevnou stěnou. Stejně tak platí, že při velké vzdálenosti od stěny dochází k interakci se stěnou pouze při 1. kolapsu a síla od 2. kolapsu je zanedbatelná. Při přibližování ke stěně, kolem hodnoty $\gamma = 4$ začíná růst síla od druhého kolapsu. Při dalším přiblížení se hodnoty sil 1. a 2. kolapsu k sobě přibližují. Vyrovnají se a při $\gamma = 2,25$ hodnota 2. kolapsu převyšuje hodnotu 1. kolapsu. Pokud se bublinka dále přibližuje ke stěně, dochází k poklesu síly od 2. kolapsu. Síla od 1. kolapsu dále roste. V příloze P4 je pro doplnění tabulka hodnot druhého měření bublinky 6,0 mm (50 V).

Jak vyplývá z předchozích grafů, tak v určité vzdálenosti od stěny dochází k přibližování hodnot maximálních sil 1. a 2. kolapsu a také, že v určité oblasti je maximální síla od 2. kolapsu větší než od 1. kolapsu. Pro názornější zobrazení byla do grafu 5.7 vynesena závislost poměru maximální síly od 2. kolapsu a maximální síly 1. kolapsu v závislosti na parametru γ . V grafu je tato závislost vynesena pro všechny poloměry a trend jednotlivých závislostí je vyznačen lomenou čarou.



Graf 5.7: Závislost poměru $F_{\max 2} / F_{\max 1}$ na parametru γ

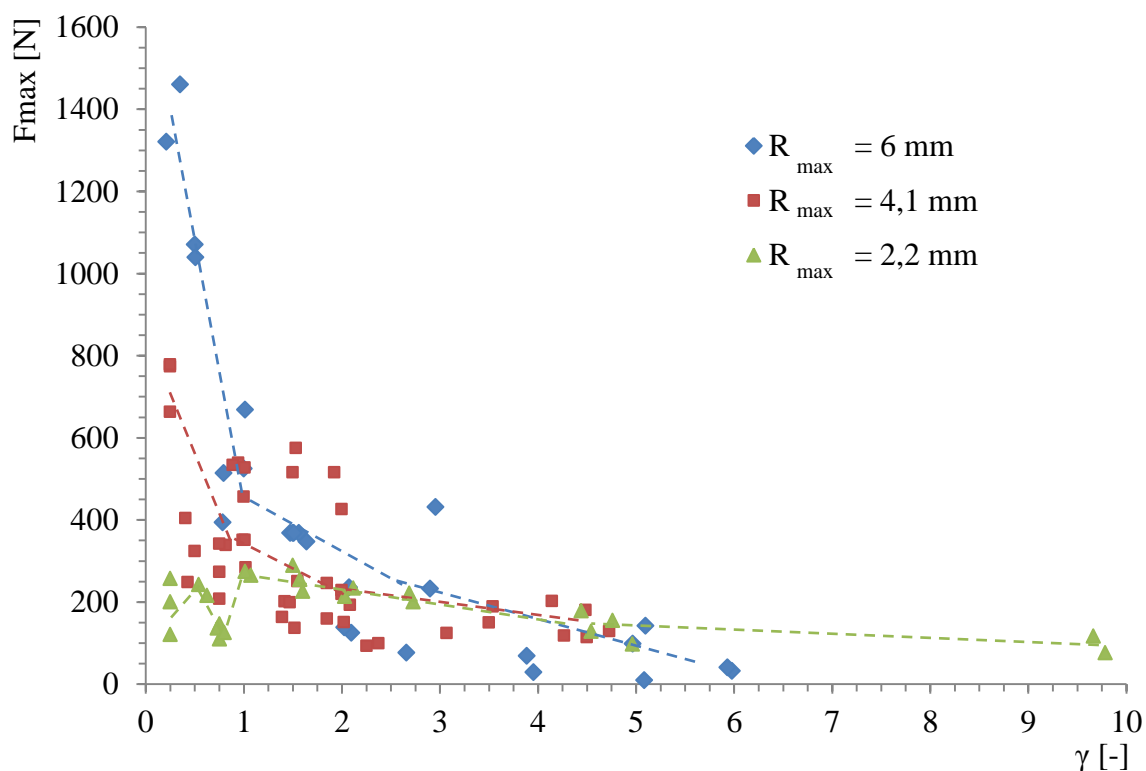
Z grafu je zřejmé, že maxima poměru $F_{\max 2}/F_{\max 1}$ není vždy dosaženo při shodných hodnotách parametru γ a že poloha maxima poměru závisí na velikosti kavitační bublinky R_{\max} . Dále je na grafu vidět, že u $\gamma > 4$ se uplatňuje první vzor chování kavitační bublinky, síla 1. kolapsu je dominantní. Se zmenšující se hodnotou R_{\max} dochází k posuvu maxima poměru $F_{\max 2}/F_{\max 1}$ k menším hodnotám γ . Uplatňuje se druhý a třetí vzor chování kavitační bublinky, který ale nastává dříve u větších bublin než u menších bublin. Hodnotu γ závislou na R_{\max} při dosažení maximálního poměru $F_{\max 2}/F_{\max 1}$ označíme jako hodnotu kritickou γ_{crit} . Závislost γ_{crit} na R_{\max} je vynesena do grafu 5.8.



Graf 5.8: Závislost γ_{crit} na poloměru R_{\max}

Z uvedených závislostí plyne důležitý závěr. Interakce kavitační bublinky a pevné stěny závisí nejen na parametru γ , ale určitě i na velikosti kavitační bublinky. Dále se domníváme, že tato závislost může být ještě složitější, a že může existovat dokonce i více vlivů.

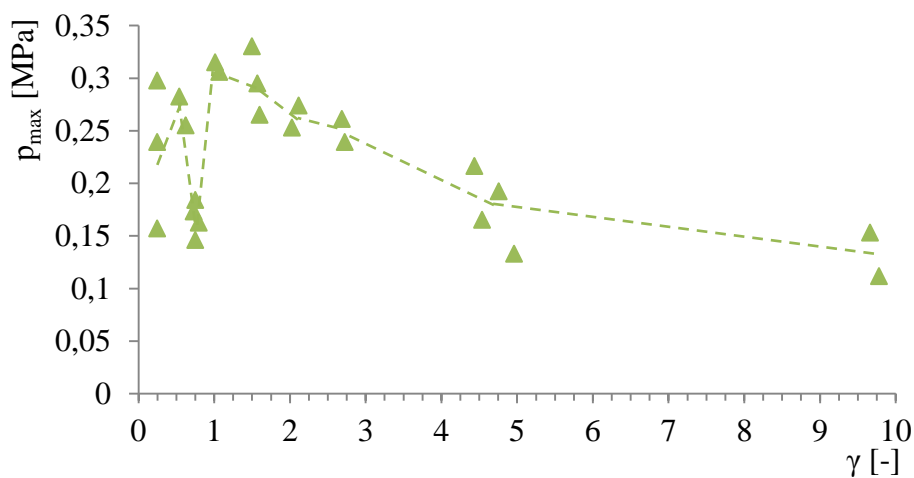
Kvantitativně je možné hodnotit silové působení na pevný povrch tak, že se vybere větší ze sil odpovídajících 1. a 2. kolapsu. Vynesením této hodnoty v závislosti na parametru γ je získán graf 5.9. Z grafu plyne, že čím je poloměr bublinky R_{\max} větší, tím je interakce bublinky s pevnou stěnou při zmenšujících se hodnotách γ větší. Tento závěr odpovídá skutečnosti, že čím je bublinka větší, tím větší je její energie.



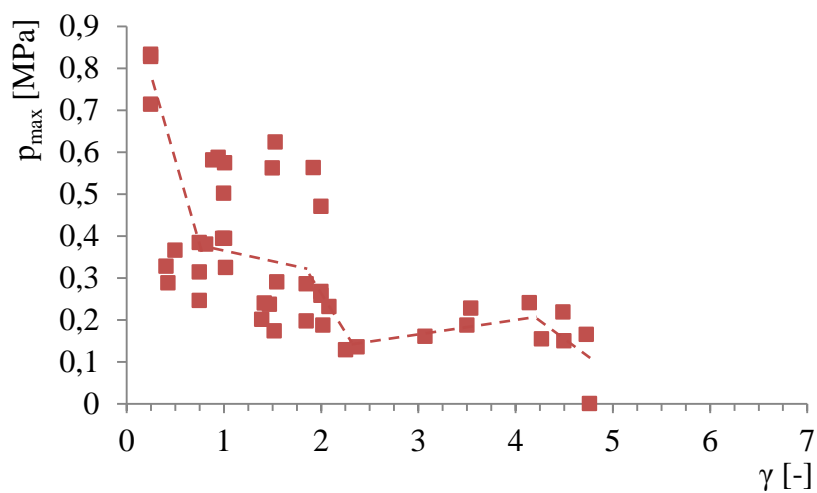
Graf 5.9: Závislost F_{\max} na poloměru γ

5.6 Mechanické napětí působící na PVDF film

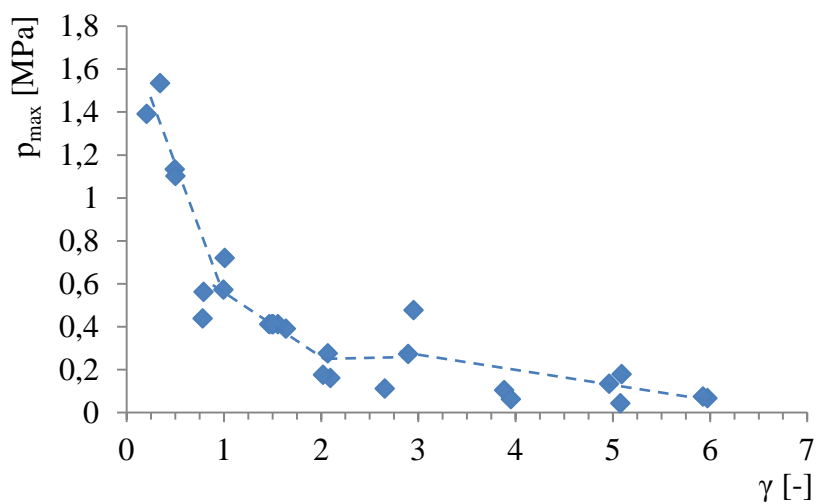
Další možností, jak hodnotit interakci kavitační bublinky s pevnou stěnou, je přepočet většího z maximálních elektrických napětí signálu 1. nebo 2. kolapsu přímo na mechanické napětí – tlak na PVDF film. Vychází se ze vztahu 5.3 a parametrů uvedených pod vztahem 5.3. Na grafech 5.10, 5.11 a 5.12 je závislost maximálního tlaku působícího na PVDF film v závislosti na parametru γ pro bublinky 2,2 mm; 4,1 mm a 6,0 mm.



Graf 5.10: Závislost maximálního tlaku na γ pro bublinku 2,2 mm



Graf 5.11: Závislost maximálního tlaku na γ pro bublinku 4,1 mm

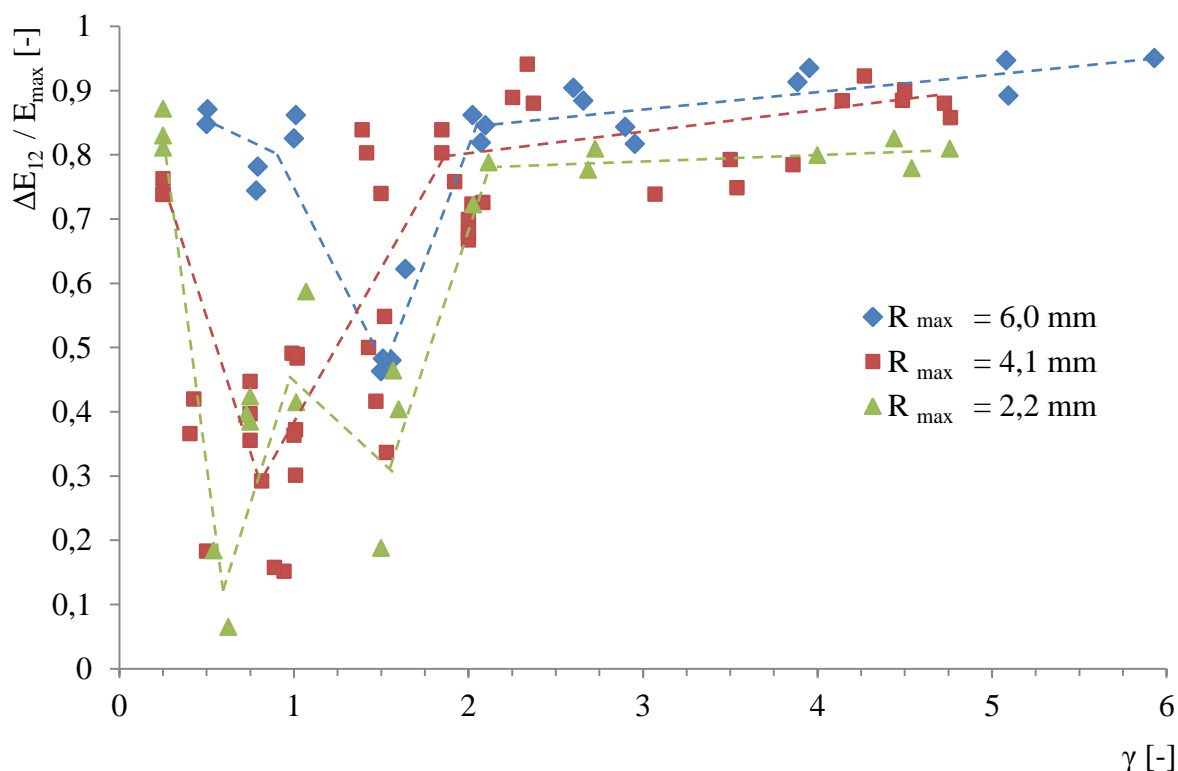


Graf 5.12: Závislost tlaku na γ pro bublinku 6,0 mm

Na grafech je vidět trend obdobný jako na grafu 5.9. Čím je bublinka blíže pevné stěně, γ se zmenšuje a maximální tlak působící na pevnou stěnu je větší. Čím je bublinka, resp. R_{\max} větší, tím je i maximální tlak působící na PVDF film větší.

5.7 Hodnocení změny energie mezi 1. a 2. kolapsem

Hodnocením snímků z CCD kamery se získaly hodnoty maximálních poloměrů před 1. a 2. kolapsem $R_{\max 1,2}$. Pokud nebylo možné poloměr zjistit ze snímků, byl použit vztah 5.1 pro výpočet teoretického poloměru. Do vztahu 5.1 se dosazuje čas kolapsu bublinky t_c , který byl zjištěn ze signálu hydrofonu. Určuje se jako polovina času mezi amplitudami start růstu bublinky – 1. kolaps a mezi amplitudami 1. kolaps - 2. kolaps. Zjištěný poloměr je dosazen do vztahu 5.2 a získá se energie kavitační bublinky. Ze znalosti energie $E_{\max 1} = E_{\max}$ bublinky při $R_{\max 1}$ a energie $E_{\max 2}$ bublinky při $R_{\max 2}$ je možné vypočítat jejich rozdíl $\Delta E_{12} = E_{\max 1} - E_{\max 2}$, který je roven energii uvolněné během doby mezi oběma R_{\max} . Je jisté, že se určitá část této energie spotřebuje na pohyb bublinky, sdílení tepla s okolím, atd., ale většina z této energie se uvolní při kolapsu. Je vhodné vztáhnout rozdíl energií ΔE_{12} k maximální energii bublinky E_{\max} podílem $\Delta E_{12}/E_{\max}$. Podíl má význam části energie uvolněné mezi oběma R_{\max} vzhledem k maximální energii bublinky. Závislost $\Delta E_{12}/E_{\max}$ na parametru γ je v grafu 5.13.



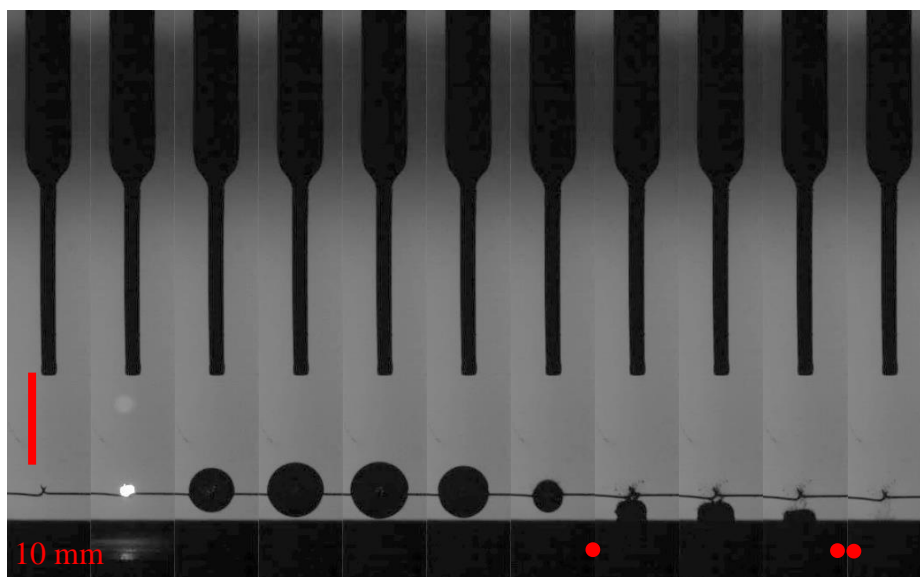
Graf 5.13: Závislost $\Delta E_{12}/E_{\max}$ na parametru γ

Z grafu plyne závěr, že pokud se bublinka vyskytuje ve větší vzdálenosti od stěny, většina energie je uvolněna při prvním kolapsu. Od určité hodnoty γ , v provedených měřeních přibližně od $\gamma = 2$, dochází k přerozdělení energie mezi další kolapsy. Poměr ukazuje právě

graf 5.13 a je zřejmé, že poměr přerozdělení energie ve prospěch dalších kolapsů se zvětšuje se zmenšujícím se poloměrem bublinky R_{\max} . Obecně se uvažuje, že většina energie je uvolněna během prvních dvou kolapsů a za tohoto předpokladu probíhá přerozdělení hlavně mezi prvním a druhým kolapsem. Minima $\Delta E_{12}/E_{\max}$ se při zmenšování poloměru R_{\max} posouvají k menším hodnotám γ .

5.8 Hodnocení snímků

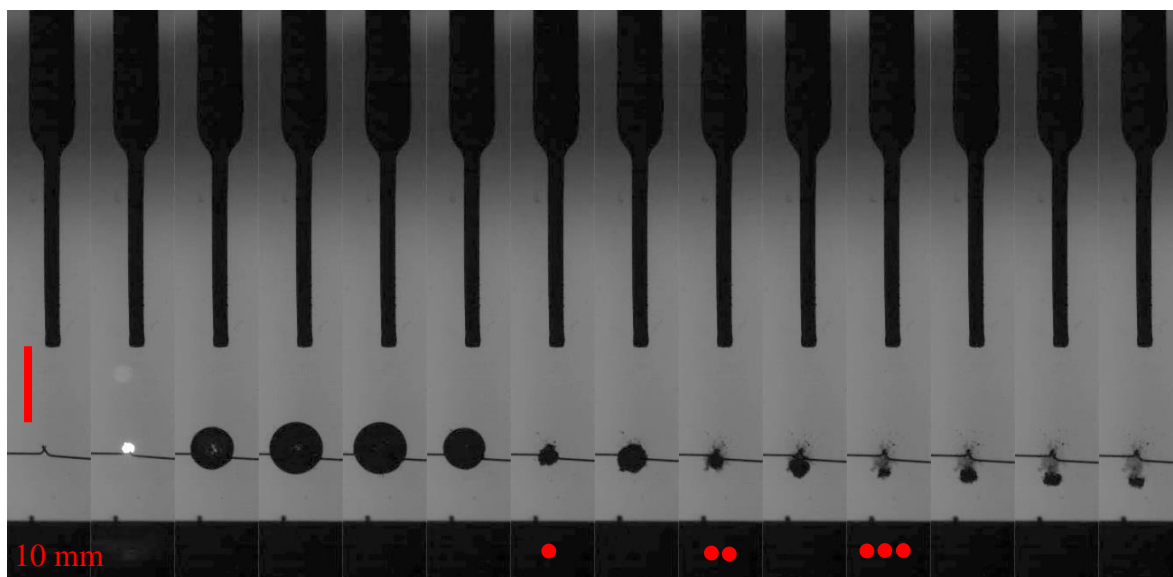
Bylo provedeno porovnání dvou sérií snímků bublinek o poloměrech 2,2 mm a 6,0 mm pro shodné $\gamma = 1,01$. Na následujícím obrázku je série snímků pro bublinku 2,2 mm a s dobou mezi snímky 100 μs . Za posledním snímkem nenásleduje další aktivita. Kolapsy a jejich pořadí je vyznačeno červenou tečkou. Časové umístění je pouze přibližné.



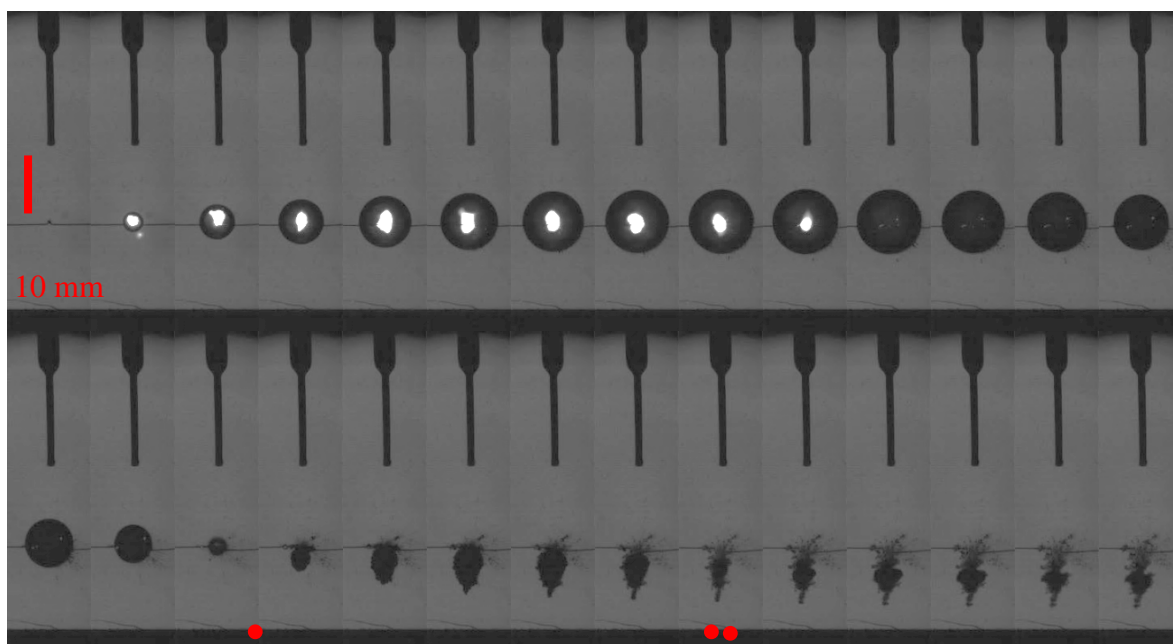
Obr. 5.5: Aktivita bublinky 2,2 mm pro $\gamma = 1,01$ (časový interval mezi snímky je 100 μs)

Série snímků pro poloměr 6,0 mm, $\gamma = 1,01$ a dobu 100 μs mezi jednotlivými snímky je totožná se snímky na obrázku 5.4. Za posledním snímkem na obrázku 5.4 následují ještě další snímky aktivity. Pokud se zaměříme na obr. 5.5, vidíme, že přibližně za 800 μs prošla bublinka celým „životem“ se dvěma kolapsy a že pak již neexistuje žádná aktivita a ani pozůstatky po bublince. Bublinka na obrázku 5.4 prochází etapou svého „života“ se dvěma kolapsy přibližně za 2700 μs , dále pokračuje v aktivitě a jsou zde po ní pozůstatky ve formě malých bublinek. Uvedené potvrzuje, že pro totožný parametr γ se bublinky s různým R_{\max} chovají odlišně.

Dále byla zkoumána rychlost přibližování bublinky k pevné stěně pro bublinku 2,2 mm s parametrem $\gamma = 2,69$ a pro bublinku 6,0 mm s parametrem $\gamma = 2,66$. Na obrázku 5.6 je série snímků bublinky 2,2 mm a na obrázku 5.7 série snímků bublinky 6,0 mm.



Obr. 5.6: Aktivita bublinky 2,2 mm pro $\gamma = 2,69$ (časový interval mezi snímky je 100 μ s)



Obr. 5.7: Aktivita bublinky 6,0 mm pro $\gamma = 2,66$ (časový interval mezi snímky je 100 μ s)

Bublinka o poloměru 2,2 mm zůstává během prvního kolapsu na stejném místě a po druhém kolapsu se v důsledku jet efektu začne přibližovat ke stěně. Třetí kolaps už nastává blíže stěně, ale posun je nepatrný. Bublinka o poloměru 6,0 mm se pohybuje ke stěně

v důsledku jet efektu už během prvního kolapsu. Druhý kolaps nastává blíže u stěny a posun je větší než u bublinky 2,2 mm.

Z obrázků plyne, že v důsledku větší frekvence kmitání menších bublinek než větších bublinek, menší bublinky procházejí jednotlivými cykly rychleji než větší bublinky. Dále je vidět, že menší bublinky jsou přitahovány ke stěně v pozdější etapě „života“ než větší bublinky. Zvážíme-li ještě energetické hledisko, kdy má větší bublinka více energie než menší, pak se domníváme, že menší bublinka nemá tak velký potenciál k posuvu k pevné stěně a následně k interakci s pevnou stěnou. Interakce je pak větší při menších vzdálenostech od stěny a maximum bude při nižších hodnotách γ než u větší bublinky. Uvedené je jedním z možných vlivů na posouvání maxima interakce ve směru zmenšování hodnoty γ při zmenšování poloměru bublinky R_{\max} .

5.9 Shrnutí vyhodnocení

Výsledky experimentu ukázaly, jaká je interakce kavitační bublinky s pevnou stěnou. Wang a Chen ve svém experimentu generovali pouze jedinou bublinku $R_{\max} = 10,4$ mm. Tato bublinka byla větší jak šířka PVDF filmu. V případě diplomové práce byly generovány bublinky o třech různých poloměrech s tím, že byly vždy menší jak šířka PVDF filmu, aby bylo zabráněno možnému působení mimo činnou plochu PVDF filmu. Dalším rozdílem byla metoda kalibrace. Wang a Chen použili kyvadlovou metodu a v rámci této práce byla použita metoda pádu kuličky z důvodu, že se jeví jako bližší aktivitě kavitační bublinky. Výsledky Wang a Chena popisují závislost interakce pouze na parametru γ . Tato práce ve vyhodnocení ukazuje, že závislost je složitější. Ukazuje se, že určitě interakce závisí i na maximálním počátečním poloměru R_{\max} . Další závislosti zatím nebyly nalezeny, ale bylo by vhodné jejich případnou existenci prozkoumat.

Zaměříme-li se na výsledky diplomové práce, je vhodné pro jejich porovnání provést měření se shodným nastavením, ale za použití jiného principu generování kavitační bublinky. Je totiž možné, že pokud jsou elektrody velmi blízko u stěny, tak nejen že poškozují PVDF film, ale mohou ovlivňovat naměřené výsledky. Ve školní laboratoři se připravuje tentýž experiment s laserem generovanou kavitační bublinkou. V tomto případě bublinka nebude ovlivněna přítomností elektrod a navíc je doba působení laseru o hodně kratší (kolem 10 ns), než u elektrod. Nevýhodou je ale přítomnost plazmy velké energie. Další možností je provést měření v kavitační komůrce, která byla vyvíjena v rámci projektu GAP101/10/1428. V kavitační komůrce se generuje ryze parní bublinka, jejíž kolaps je vybuzen pomocí

piezoelektrického aktuátoru. Takto generovaná bublinka by se nejvíce přibližovala skutečné kavitační bublince.

Data použitá pro zpracování jsou součástí rozsáhlejších měření realizovaných v rámci projektu GAP101/10/1428. Tato data jsou dále doplňována a zpřesňována a předpokládá se jejich další publikace v odborných časopisech.

6 ZÁVĚR

Diplomová práce se zabývá problematikou mechanismu kolapsu kavitačních bublinek, vyskytujících se v blízkosti pevných stěn. Úvodní část práce obsahuje rešerši dostupných informací k této problematice a to jak z knižních zdrojů, tak i z časopiseckých zdrojů založených z většiny na experimentálních poznatcích. Tato část je doplněna o rešerši možných způsobů generování kavitačních bublinek a uzavírá se krátkou podkapitolou o kavitačním poškození povrchů materiálu. Následuje kapitola popisující experimentální sestavu a princip experimentu, generování kavitační bublinky a hlavní část sestavy - ocelovou destičku s PVDF filmem. Je zde také uveden popis všech použitých zařízení při experimentu a podkapitola, ve které je provedena diskuze nad omezením experimentu. Jednalo se zejména o témata: vliv teploty kapaliny, vodivosti kapaliny, doby zapojení obvodu generátoru bublinek a opakovatelnost generovaného poloměru bublinky. Další kapitola se zabývá kalibrací PVDF filmu. Popisují se zde dynamické vlastnosti PVDF filmu, měření piezoelektrické nábojové konstanty d_{33} , metody kalibrace a její vyhodnocení a vlastní kalibrace metodou pádu kuličky s nalezenými kalibračními křivkami pro PVDF film. Dále jsou popsána omezení použití měření PVDF filmem. Za touto kapitolou následuje nejdůležitější kapitola diplomové práce o experimentu. Je zde popsáno nastavení experimentu, metodika vyhodnocení měření a výsledky měření. Výsledky obsahují nalezené vzory chování kavitační bublinky v blízkosti pevné stěny, vyhodnocení interakce kavitační bublinky s pevnou stěnou na základě signálů z PVDF filmu a hydrofonu a snímků z CCD kamery.

V současnosti byla zvládnuta metodika měření interakce kavitační bublinky s pevnou stěnou pomocí PVDF filmu. Zkoumání by měly být podrobeny vlivy na generování kavitační bublinky jako je například teplota nebo vodivost kapaliny. Vedle měření, provedeného v rámci této diplomové práce, by bylo vhodné pro porovnání provést měření s laserem generovanou kavitační bublinkou a následně s ryze parní bublinkou na kavitační komůrce.

Seznam použité literatury

- [1] NOSKIEVIČ, J.: *Kavitace*. Praha: ACADEMIA, 1969.
- [2] BRDIČKA, M.; SAMEK, L.; TARABA, O.: *Kavitace Diagnostika a technické využití*. Praha: SNTL, 1981.
- [3] NOSKIEVIČ, J. A KOL.: *Kavitace v hydraulických strojích a zařízeních*. Praha: SNTL, 1990.
- [4] BRENNEN, CH., E.: *Cavitation and Bubble Dynamics*. Oxford: Oxford University Press, 1995
- [5] FRANC, J., P.; MICHEL, J., M.: *Fundamentals of cavitation*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2004
- [6] *VECTIS User Manual, Version 2012.1*, Ricardo, 2012 [online]. [30.3.2013].
URL: < <http://www.software.ricardo.com/support/manuals/vectis/html/2012.1/vectis/>>.
- [7] SHEPHERD, J.E.; STURTEVANT, B.: *Rapid evaporation near the superheat limit*. J. Fluid Mech., 121, 379–402, 1982.
- [8] FROST, D.; STURTEVANT, B.: *Effects of ambient pressure on the instability of a liquid boiling explosively at the superheat limit*. ASME J. Heat Transfer, 108, 418 - 424, 1986.
- [9] TOMITA, Y.; SHIMA, A.: *High-speed photographic observations of laser-induced cavitation bubbles in water*. Acustica, 71, No. 3, 161-171, 1990.
- [10] OBRESCHKOW, D.; TINGUELY, N.; DORSAZ, N.; KOBEL, N.; BOSSET, A.; FARHAT, M.: *Universal scaling law for jets of collapsing bubbles*. Physical Review Letters, 107, 204501, 2011.
- [11] BENJAMIN, T., B.; ELLIS, A., T.: *The collapse of cavitation bubbles and the pressures thereby produced against solid boundaries*. London: Phil. Trans. Roy. Soc., Ser. A, 260, 221-240, 1966.
- [12] TOYTMAN I., SILBERGLEIT A., SIMANOVSKY D., PALANKER D.: *Multi-focal laser surgery: cutting enhancement by hydrodynamic interactions between cavitation bubbles*. Physical Review E, 2010.
- [13] XU, W.; BAI, L.; ZHANG, F.: *Interaction of a cavitation bubble and an air bubble with a rigid boundary*. Journal of Hydrodynamics, 22(4), 503-512, 2010.
- [14] BAI, L.; XU, W.; TIAN, Z.; LI, N.: *A high-speed photographic study of ultrasonic cavitation near rigid boundary*. Journal of Hydrodynamics, 20(5), 637-644, 2008.
- [15] BUOGO, S.; VOKURKA, K.: *Intensity of oscillation of spark-generated bubbles*. Journal of Sound and Vibration, 329, 20, 4266-4278, 2010.
- [16] LEW, K., S., F.; KLASEBOER, E.; KHOO, B., CH.: *A collapsing bubble-induced micropump: An experimental study*. Sensors and Actuators A: Physical, 133, 1, 161-172, 2007.

- [17] MÜLLER, M.: *Dynamic behaviour of cavitation bubbles generated by laser*. Liberec: TU v Liberci, 2008. ISBN 978-80-7372-241-8.
- [18] MÜLLER, M.: *Fotografie laserem generovaných bublin*. Archiv autora. Publikováno se souhlasem autora.
- [19] KUMAR, P., SAINI, R., P.: *Study of cavitation in hydro turbines—A review*, Renewable and Sustainable Energy Reviews 14, 374–383, 2010.
- [20] HART, D.; WHALE, D.: *Review of cavitation–erosion resistant weld surfacing alloys for hydroturbines*. [online]. [1.4.2013].
URL: <www.castolin.com/wCastolin_com/pdf/publications/CaviTec.pdf>.
- [21] WANG, Y., C.; CHEN, Y., W.: *Application of piezoelectric PVDF film to the measurement of impulsive forces generated by cavitation bubble collapse near a solid boundary*. Experimental Thermal and Fluid Science, 32, 403–414, 2007.
- [22] *Otevřená encyklopedie Wikipedie, obrázky, pojmy* [online].
[8.4.2013]. URL: <<http://www.wikipedia.org/>>.
- [23] *Internetové stránky National Instrument Corporation, Products & services* [online].
[8.4.2013]. URL: <<http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/cs/nid/203023>>.
- [24] JENČÍK, J.; VOLF, J. a kol.: *Technická měření*. Praha: ČVUT, 2000.
- [25] Technical Manual. *Piezo Film Sensors*. Measurement Specialities. Norristown, 2000.
- [26] PETŘÍKOVÁ, M.; KRYŠTŮFEK, P.: *Tabulky a diagramy pro termodynamiku*. Liberec: TUL, 2009.
- [27] MÜLLER, M.; HUJER, J.; KOTEK, M.; ZIMA, P.: *Identification of collapse patterns of cavitation bubbles close to a solid wall*. In Vít, T.; Dančová, P.; Novotný, P. (ed.). Experimental Fluid Mechanics 2012. Liberec : Technical University of Liberec, 2012, S. 494–497. ISBN 978-80-7372-912-7. [Experimental Fluid Mechanics 2012, Hradec Králové, 20.11.2012–23.11.2012, CZ].
- [28] BOLDIŠ, P.: *Bibliografické citace dokumentu podle ČSN ISO 690 a ČSN ISO 690-2: Část 1 – Citace: metodika a obecná pravidla. Verze 3.3*. [online].
[2.5.2013]. URL: <<http://www.boldis.cz/citace/citace1.pdf>>.
- [29] BOLDIŠ, P.: *Bibliografické citace dokumentu podle ČSN ISO 690 a ČSN ISO 690-2: Část 2 – Modely a příklady citací u jednotlivých typu dokumentu. Verze 3.0*. [online]. [2.5.2013]. URL: <<http://www.boldis.cz/citace/citace2.pdf>>.

Seznam příloh

Příloha P1 - Tabulka měření opakovatelnosti poloměru pro elektrické napětí 40 V

Příloha P2 - Tabulka měření piezoelektrického koeficientu d_{33}

Příloha P3 - Tabulka kalibrace PVDF filmu

Příloha P4 - Tabulka hodnot 2. série měření bublinky 6 mm (50 V)

Příloha P1 – Tabulka měření opakovatelnosti poloměru pro elektrické napětí 40 V

Měření číslo	1	2	3	4	5	6	7
Maximální poloměr [mm]	4,157	3,976	4,157	4,337	4,157	4,157	4,157
Měření číslo	8	9	10	11	12	13	14
Maximální poloměr [mm]	4,337	4,157	4,337	3,976	3,976	4,157	4,337
Měření číslo	15	16	17	18	19	20	21
Maximální poloměr [mm]	4,157	4,518	4,337	4,518	4,337	4,518	4,518

Příloha P2 – Tabulka měření piezoelektrického koeficientu d_{33}

Měření piezoelektrické konstanty d33 [10 ⁻¹² C.N ⁻¹] PVDF filmu na piezo d33 metru (teplota 21 °C; tlak 100,5 KPa)											
Pozice	Měření číslo					Výpočet nejistoty (bez zaokrouhlení)					Výsledek měření d ₃₃ [10 ⁻¹² C.N ⁻¹]
	1	2	3	4	5	Aritmetický průměr [10 ⁻¹² C.N ⁻¹]	Nejistota typu A [10 ⁻¹² C.N ⁻¹]	Nejistota typu B [10 ⁻¹² C.N ⁻¹]	Kombinovaná standardní nejistota C [10 ⁻¹² C.N ⁻¹]	Rozšířená standardní nejistota (spolehlivost 95%) [10 ⁻¹² C.N ⁻¹]	
1	30,6	30,8	30,3	31,6	31,3	30,920	0,330	0,316	0,457	0,913	30,9±0,9
2	27,6	27,2	26,1	26,5	27,4	26,960	0,397	0,276	0,484	0,968	27,0±0,9
3	28,6	29,7	30,8	29,4	30,2	29,740	0,519	0,308	0,604	1,208	29,7±1,2
4	31,3	31,5	32,1	32,4	31,7	31,800	0,280	0,324	0,428	0,856	31,8±0,9
5	34,7	34,3	33,2	33,9	33,5	33,920	0,377	0,347	0,512	1,024	33,9±1,0
6	30,1	30,4	30,6	30,2	30,8	30,420	0,179	0,308	0,356	0,713	30,4±0,7
7	29,9	30,8	30,7	30,1	30,1	30,320	0,252	0,308	0,398	0,796	30,3±0,8
8	31,8	31,1	30,4	30,2	31	30,900	0,396	0,318	0,508	1,016	30,9±1,0
9	31,4	32	31,5	30	31,7	31,320	0,484	0,320	0,580	1,160	31,3±1,2

Příloha P3 – Tabulka kalibrace PVDF filmu

Číslo měření/průměr kuličky [mm]	Počáteční výška [m]	Konečná výška [m]	Maximální napětí [V]	Střední napětí [V]	Délka pulzu [ms]	Síla nárazu [N]
1/6	0,212222	0,071111	1,310790	0,764952	0,000030	95
2/6	0,205926	0,067407	1,102120	0,646984	0,000029	96
3/6	0,201481	0,061852	1,095280	0,653753	0,000034	80
4/6	0,202222	0,057037	1,073040	0,650110	0,000032	84
5/6	0,197778	0,059259	1,112380	0,690871	0,000033	81
6/6	0,198519	0,061852	1,014890	0,613001	0,000031	88
7/6	0,194444	0,057407	1,132910	0,654140	0,000035	77
8/6	0,194074	0,053704	1,072120	0,623640	0,000037	72
9/6	0,185556	0,059259	1,037120	0,599773	0,000036	74
10/6	0,185556	0,050370	0,990944	0,576559	0,000039	66
11/6	0,183704	0,054444	0,898583	0,548588	0,000034	76
12/6	0,181111	0,056296	1,009760	0,604443	0,000035	74
13/6	0,175926	0,056667	1,026860	0,591314	0,000036	72
14/6	0,176667	0,061111	1,141460	0,668673	0,000030	88
15/6	0,171111	0,047778	0,917397	0,542363	0,000040	62
16/6	0,171111	0,050370	0,882269	0,530586	0,000038	66
17/6	0,167407	0,055926	1,014890	0,589304	0,000033	77
18/6	0,169259	0,053333	0,912266	0,540741	0,000036	70
19/6	0,161481	0,050000	0,965288	0,559797	0,000039	63
20/6	0,163333	0,052222	0,949895	0,568002	0,000035	71
21/6	0,159259	0,051481	0,982392	0,573794	0,000036	69
22/6	0,157778	0,050370	0,948184	0,560903	0,000033	73
23/6	0,154074	0,049630	0,881769	0,526252	0,000034	71
24/6	0,153704	0,049259	0,994365	0,597079	0,000035	68
25/6	0,149630	0,046667	0,849271	0,511096	0,000038	62
26/6	0,150000	0,049630	0,982392	0,587624	0,000035	68
27/6	0,146296	0,047407	0,970420	0,570286	0,000034	68
28/6	0,146296	0,051111	0,970420	0,553559	0,000034	69
29/6	0,141111	0,048889	0,929370	0,542313	0,000036	66
30/6	0,142593	0,048519	0,917397	0,526134	0,000036	66
31/6	0,138889	0,045926	0,922818	0,540846	0,000036	64
32/6	0,134444	0,047778	0,917397	0,524958	0,000034	66
33/6	0,128889	0,047037	0,917397	0,527808	0,000034	65
34/6	0,126296	0,043704	0,862954	0,514557	0,000035	63
35/6	0,125556	0,041852	0,774014	0,443011	0,000039	57
36/6	0,120000	0,041852	0,937922	0,534141	0,000038	56
37/6	0,123704	0,042222	0,840430	0,484800	0,000038	58
38/6	0,117407	0,039259	0,744648	0,433723	0,000041	52
39/6	0,115926	0,040741	0,766883	0,452043	0,000039	54
40/6	0,113333	0,038148	0,802801	0,458402	0,000041	51
41/6	0,114815	0,038148	0,689915	0,391949	0,000041	50
42/6	0,110741	0,038889	0,795960	0,451670	0,000040	52
43/6	0,111111	0,038889	0,838719	0,469356	0,000041	51
44/6	0,105185	0,037407	0,807932	0,454717	0,000042	49
45/6	0,106667	0,038148	0,807932	0,454717	0,000042	49

46/5	0,221481	0,084074	0,870296	0,505812	0,000029	58
47/5	0,221111	0,082963	0,883479	0,519376	0,000028	62
48/5	0,216667	0,082963	0,883479	0,504173	0,000032	54
49/5	0,217407	0,083704	0,858534	0,503143	0,000029	58
50/5	0,214074	0,079630	0,809432	0,476693	0,000031	55
51/5	0,214074	0,076667	0,849271	0,492785	0,000029	58
52/5	0,208519	0,078148	0,834588	0,489706	0,000030	56
53/5	0,207407	0,078519	0,860954	0,511813	0,000027	62
54/5	0,204815	0,077037	0,827747	0,470421	0,000034	48
55/5	0,204074	0,078148	0,826036	0,476220	0,000031	53
56/5	0,200741	0,076296	0,841430	0,486069	0,000032	52
57/5	0,194444	0,072593	0,826036	0,490066	0,000028	58
58/5	0,194074	0,071481	0,928660	0,521556	0,000028	58
59/5	0,191481	0,071852	0,814774	0,478551	0,000029	55
60/5	0,191111	0,070370	0,847271	0,478500	0,000030	53
61/5	0,188148	0,071111	0,791828	0,457780	0,000029	55
62/5	0,188519	0,071481	0,823326	0,480581	0,000029	55
63/5	0,184815	0,071111	0,770304	0,446291	0,000031	50
64/5	0,185185	0,072222	0,780566	0,445837	0,000032	50
65/5	0,180741	0,066667	0,814774	0,461685	0,000031	49
66/5	0,180741	0,069630	0,754910	0,434470	0,000031	50
67/5	0,177037	0,066667	0,757621	0,439060	0,000031	49
68/5	0,177037	0,067778	0,782566	0,448724	0,000032	49
69/5	0,173704	0,068889	0,765173	0,439758	0,000032	47
70/5	0,174074	0,068519	0,773724	0,449671	0,000032	48
71/5	0,169259	0,064815	0,725834	0,415682	0,000032	47
72/5	0,169630	0,067778	0,776435	0,448934	0,000032	47
73/5	0,165926	0,064444	0,734175	0,420910	0,000032	47
74/5	0,166296	0,067037	0,741227	0,426437	0,000032	47
75/5	0,162963	0,063333	0,710440	0,408682	0,000034	44
76/5	0,162593	0,066296	0,763462	0,427647	0,000033	45
77/5	0,158889	0,063704	0,705309	0,404331	0,000033	45
78/5	0,158519	0,062963	0,726834	0,411126	0,000033	44
79/5	0,154815	0,057778	0,672101	0,391194	0,000033	43
80/5	0,155185	0,061111	0,701888	0,399231	0,000030	48
81/5	0,151111	0,058889	0,698467	0,395655	0,000035	41
82/5	0,151481	0,059630	0,689915	0,396206	0,000034	43
83/5	0,144815	0,055556	0,783276	0,431751	0,000032	44
84/5	0,145185	0,056667	0,708730	0,401287	0,000031	44
85/5	0,139259	0,057778	0,698467	0,394692	0,000035	40
86/5	0,139259	0,053333	0,652287	0,379455	0,000034	40
87/5	0,132593	0,053704	0,626631	0,359654	0,000033	41
88/5	0,133333	0,054444	0,643735	0,364965	0,000034	39
89/5	0,127037	0,051852	0,650576	0,366129	0,000035	38
90/5	0,127407	0,052593	0,604396	0,346762	0,000034	39
91/5	0,120000	0,048519	0,585581	0,325925	0,000036	36
92/5	0,120741	0,051852	0,640314	0,346532	0,000037	35
93/5	0,114815	0,048889	0,604396	0,336463	0,000038	33
94/5	0,115185	0,050370	0,590713	0,322764	0,000043	30

Příloha P4 – Tabulka hodnot 2. série měření bublinky 6 mm (50)

Pozn. buňky ve skutečnosti obsahují nezaokrouhlená čísla s dlouhým rozvojem, zde jsou čísla zaokrouhlená na dvě desetinná místa.

Tabulka hodnot 2. série měření bublinky 6 mm (50 V)																		
U [V]	ν [-]	U_{Fmax1} [V]	t_1 [μs]	R_{max1} [mm]	U_{phmax1} [V]	F_{max1} [N]	p_{hmax1} [Pa]	E_1 [mJ]	p_{fmax1} [Pa]	U_{Fmax2} [V]	t_2 [μs]	R_{max2} [mm]	U_{phmax2} [V]	F_{max2} [N]	p_{hmax2} [Pa]	E_2 [mJ]	p_{fmax2} [Pa]	F_{m2}/F_{m1} [-]
50	5,93	0,69	649	6,13	1,82	40,88	0,63	94,23	74406	0	-	2,25	0	0	0	4,65	0	0,00
50	5,08	0,40	523	5,99	0,91	10,21	0,31	87,92	42863	0	-	2,25	0	0	0	4,65	0	0,00
50	3,95	0,58	582	6,13	1,11	29,17	0,38	94,23	62366	0	-	2,46	0,12	0	0,04	6,08	0	0,00
50	2,95	4,40	819	6,2	7,88	431,67	2,72	97,50	476186	2,03	348	3,52	3,30	182,45	1,14	17,81	219951	0,42
50	2,66	1,03	696	5,77	1,05	77,09	0,36	78,58	111632	0,78	295	2,81	0,74	50,52	0,26	9,06	84313	0,66
50	2,10	1,15	604	5,77	0,83	89,45	0,29	78,58	124333	1,49	329	3,09	0,89	125,18	0,31	12,05	161073	1,40
50	1,47	2,47	773	6,13	1,98	228,74	0,68	94,23	267550	3,80	451	3,09	7,34	368,93	2,53	12,05	411682	1,61
50	1,01	4,49	895	5,99	8,56	441,30	2,95	87,92	486088	6,65	474	3,09	11,16	668,53	3,85	12,05	719712	1,51
50	0,79	4,74	869	5,14	4,80	467,87	1,65	55,55	513405	5,19	434	3,09	10,87	514,60	3,75	12,05	561449	1,10
50	0,51	10,18	845	6,13	10,39	1040,07	3,58	94,23	1101710	3,48	447	3,09	9,78	334,56	3,37	12,05	376344	0,32